

Trabajo de fin de grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Diseño y modelado de la instalación eléctrica de un túnel de carretera que circula por debajo de un canal

MEMORIA

Autor: Marc Monclús Navarro
Director: Joaquín Fernandez Sanchez
Codirector: Francisco Alpiste Penalba
Convocatoria: Enero 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

Este es un proyecto de final de grado que trata sobre la instalación eléctrica de baja y media tensión de un túnel bitubo que pasa por debajo de un canal, está dirigido conjuntamente con la empresa SENER, una empresa internacional de ingeniería.

En este trabajo se describen y se tratan los diferentes elementos necesarios que influyen en la distribución de la energía por ambos túneles, con tal de poder alimentar a las diferentes cargas finales. Se proponen y se dimensionan los diferentes equipos para poder afrontar posibles situaciones de emergencia donde algunos de los equipos de media o baja tensión queden fuera de servicio.

Además, se realizará un modelado 3D de uno de los edificios alimentadores donde se sitúan los equipos eléctricos mencionados anteriormente, se utilizará el software *Revit*, el cual sigue la tecnología BIM (Building Information Modeling).

Briefing

This is an end-of-degree project that deals with the low and medium voltage electrical installation of a bitube tunnel that goes under a river, and is directed by the company SENER, an international engineering company.

This work describes and discusses the different necessary elements that influence the current distribution in both tunnels, in order to be able to feed the different final loads. The different equipment is proposed and sized to be able to face possible situations where some of the medium or low voltage equipment is out of service.

In addition, a 3D model of one of the feeder buildings where the aforementioned electrical equipment is located will be made using Revit software, which follows BIM (Building Information Modeling) technology.

Sumario

1. Introducción	8
2. Necesidad, objetivos y alcance del proyecto	10
3. Solución adoptada	12
4. Media Tensión	13
4.1. Descripción del sistema de media tensión	13
4.2. Modos de funcionamiento	15
4.2.1. Modo Normal	16
4.2.2. Modo Degradado 1	18
4.2.3. Modo Degradado 2	23
4.3. Energía de emergencia (Generadores)	26
5. Baja Tensión	28
5.1. Descripción del sistema de Baja Tensión	28
5.2. Sistema de baja tensión de 690V	29
5.3. Sistema de Baja tensión de 400V	30
5.4. Clasificación de las cargas	32
5.5. Distribución de la corriente en baja tensión	33
5.6. Energía de Emergencia (SAI)	34
5.7. Modos de Funcionamiento	35
5.7.1. Modo Normal	35
5.7.2. Modo Degradado (Fallo Transformador)	37
5.7.3. Modo emergencia	39
6. Dimensionamiento transformadores MT/BT	41
7. Cálculo de los cables de Media Tensión	43
7.1. Dimensionamiento Sección S1	43

7.2. Caída de tensión	49
7.3 Protecciones	50
8. Modelado 3D	51
8.1. Que es la tecnología BIM ?	51
8.2. Las dimensiones del BIM	52
8.3. Software <i>Revit</i>	53
8.4. Modelado Edificio Técnico Oeste	53
8.4.1. Transformador 2500 kVA (0,4 kV/22 kV)	59
8.4.2. Transformador 2000 kVA (22/0,69kV)	60
8.4.3. Transformador 3150 kVA (22/0,4kV)	61
8.4.4. Celdas de media tensión	62
8.4.5. SAI	63
8.4.6. Armario de Baja Tensión	64
8.4.7. Bandejas de cables	65
9. Organigrama	67
10. Diagrama de las actividades	69
11. Presupuesto	71
12. Bibliografía	76
13. Agradecimientos	77

Glossario

Switchgear o celdas de Media Tensión: Conjunto continuo de secciones verticales (Celdas) en las cuales se ubican equipos de maniobra (interruptores de potencia extraíbles, seccionadores, etc.), medida (transformadores de corriente y de tensión, etc), y, cuando se solicite, equipos de protección y control, montados en uno o más compartimientos insertos en una estructura metálica externa, y que cumple la función de recibir y distribuir la energía eléctrica.

Barra colectora o embarrado: Conductor eléctrico metálico constituidos de barras gruesas que se emplea para captar, transportar o distribuir corrientes eléctricas, de un circuito a otro, de gran intensidad. Las barras son usualmente de cobre y ocasionalmente de aluminio.

Disyuntor: es un interruptor automático que corta o abre el paso de corriente eléctrica si se cumplen determinadas condiciones. Sirve para proteger a las personas y a los dispositivos eléctricos.

Sistema de back-Up o de respaldo: Un sistema de respaldo eléctrico es un conjunto de componentes y dispositivos electrónicos que permite garantizar un suministro sin interrupciones de energía eléctrica para un hogar, comercio u oficina.

Interlock: Un interruptor de seguridad es simplemente un medio de desconexión (basado en cuchillas) montado en el interior de un gabinete. El gabinete proporciona un grado de protección al personal en contra de contactos involuntarios con equipo eléctrico energizado.

SAI o UPS: Un SAI es un Sistema de Alimentación Ininterrumpida, son dispositivos que se utilizan para proporcionar protección contra problemas eléctricos y cortes de corriente también son conocidos por sus siglas en Inglés UPS (Uninterruptible Power Supply).

By-pass: Un *bypass* eléctrico es una desviación de un circuito eléctrico que permite la comunicación directa entre dos puntos. En cuanto a los equipos electrónicos, el UPS *online* tiene una variante llamada *bypass*, que consiste en un paso paralelo que deriva la corriente eléctrica de forma directa desde la entrada hacia la salida del UPS.

Rectificador: Dispositivo electrónico que permite convertir la corriente alterna en corriente continua.

Ondulador: Dispositivo electrónico que permite convertir la corriente continua en corriente alterna.

1. Introducción

Este es un proyecto asignado a la empresa internacional de servicios profesionales de ingeniería SENER, es por este motivo que se lleva a cabo juntamente con la multinacional, debido a que el autor está trabajando en la empresa.

Para situarnos dentro del marco del trabajo, se va a realizar una parte del proyecto ganado por SENER, concretamente la parte de instalación eléctrica de un túnel bitubo que pasa por debajo de un canal. La totalidad del proyecto tiene una duración de unos 2 años aproximadamente y se trata del diseño conceptual, básico y detallado de los túneles, así como las obras civiles, instalaciones electromecánicas y de comunicaciones de transporte inteligente asociadas.

Los trabajos abarcan:

- Dos túneles, excavados con técnica TBM (*Tunnel Boring Machine*) de 2km aproximadamente cada uno.
- Una carretera de 9 km de longitud.
- Los pasos de emergencia entre túneles; así como las instalaciones asociadas a todos estos componentes (túneles, carretera y pasos), como son la alimentación eléctrica y subestaciones, la iluminación, la protección contra incendio y ventilación, los enlaces de conexión con las carreteras existentes a ambos lados, etc.

La realización completa del proyecto, es una obra compleja que conlleva la ejecución de muchos proyectos simultáneamente, como pueden ser:

- El estudio y tratamiento de las tierras.
- El impacto ambiental.
- La obra civil para la construcción de la nueva infraestructura.
- El diseño y desarrollo de la carretera.
- El diseño y desarrollo de todos los aspectos eléctricos.

Dentro de todos estos puntos importantes a trabajar en la construcción de los túneles, este proyecto se centrará fundamentalmente en la parte del diseño de los equipos de suministro eléctrico, es decir, se encargará de definir las instalaciones eléctricas necesarias para que los túneles estén totalmente abastecidos a partir de las líneas eléctricas de la compañía distribuidora de la zona, por lo tanto, este trabajo se centra en los túneles para automóviles, y dentro de estos, en las instalaciones eléctricas de baja y media tensión.

Para situarnos un poco dentro del marco geográfico del proyecto, los túneles se construyen como parte del marco de plan de desarrollo de la región del Canal de Suez. Los túneles contribuirán a la expansión del norte del canal, así mismo ayudando a crear y a mejorar una zona industrial, completando la ampliación de la carretera costera.

Además, se va a realizar un diseño 3D de las instalaciones eléctricas de uno de los cuatro edificios técnicos que constituyen los túneles, coordinando este diseño con la obra civil del edificio. Para ello se va utilizar *Revit*, un software de modelado de información de construcción (BIM -*Building Information Modeling*-), que permite diseñar cualquier tipo de edificio y algunas de sus instalaciones.

2. Necesidad, objetivos y alcance del proyecto

Dentro de todos estos puntos importantes a trabajar y a tener en cuenta en la construcción de los túneles, este proyecto se centra fundamentalmente en la parte del diseño de los equipos de suministro eléctrico, es decir, se encarga de definir las instalaciones eléctricas necesarias para que los túneles estén totalmente abastecidos a partir de las líneas eléctricas de la compañía distribuidora de la zona, por lo tanto, este trabajo se enfoca en las instalaciones eléctricas de baja y media tensión.

La necesidad de este trabajo es la de realizar una instalación eléctrica eficaz y segura ante cualquier fallo de los diferentes elementos que constituyen las redes de media y baja tensión, para poder ofrecer seguridad y fiabilidad a la zona en desarrollo del canal. Para ello se van a tener que definir y estructurar todos los diferentes elementos necesarios, desde los Switchgear de Media Tensión hasta los diferentes equipos de Back-up, para un funcionamiento correcto y de calidad de todas las cargas que puedan existir en los túneles en cualquier escenario.

Además, existe la necesidad de elaborar un diseño 3D para poder simplificar cualquier proceso durante la obra. Y en un futuro, poder facilitar un proceso de mantenimiento o una ampliación de la red eléctrica consiguiendo un diseño documentado para poder facilitar dichos procesos.

Por lo tanto, como objetivos principales del proyecto dentro de las instalaciones, encontramos los siguientes grandes bloques:

- Analizar el sistema de red eléctrica de Media Tensión y con ello:
 - Definir los diferentes equipos necesarios para que el servicio de red eléctrica de la compañía del país pueda suministrar energía a ambos túneles.
 - Estudiar el comportamiento y las soluciones en las posibles situaciones donde alguno de estos elementos falle.

- Analizar el sistema de red eléctrica de Baja Tensión y con ello:
 - Definir la variedad de redes que habrá según el voltaje para alimentar a los equipos de los túneles y los elementos necesarios para que la energía eléctrica proveniente de la compañía llegue a las cargas finales con efectividad a través de las redes de media y baja tensión.
 - Estudiar el comportamiento y las soluciones en las posibles situaciones donde alguno de estos elementos falle.
- Modelar uno de los cuatro edificios técnicos que constituyen ambos túneles, mediante el software *Revit*, tanto de la arquitectura como de los elementos eléctricos con el fin de coordinar mejor la obra.

Las instalaciones eléctricas estarán situadas en cuatro edificios, ubicados en cada boca del túnel, boca Norte y boca Sur, y en el punto medio del túnel Norte y Sur, como se explicará más adelante, de esta manera se va a poder dar servicio a la demanda total de los túneles. Solo se realizará el diseño 3D de uno de los edificios, concretamente el *West Technical Building*, ya que es el edificio más completo.

3. Solución adoptada

En referencia a la estructura de la obra de los túneles, encontraremos dos túneles unidireccionales, con varios pasos entre túneles, será en los edificios técnicos donde encontraremos los elementos que servirán para conectarse a la red de la compañía, y alimentar a las diferentes cargas del túnel. Encontraremos dos en la entrada de cada boca de los túneles, *Edificio Técnico Oeste* y *Edificio Técnico Este* y dos más justo en el punto más bajo de ambos túneles, *Edificio Técnico Norte* y *Edificio Técnico Sur*, en estos dos últimos la compañía eléctrica no se va a conectar, sino que solo servirán para distribuir la corriente.

Estos cuatro Edificios técnicos van a quedar unidos por dos bucles, el norte y el sur como podemos ver en la siguiente imagen 1.

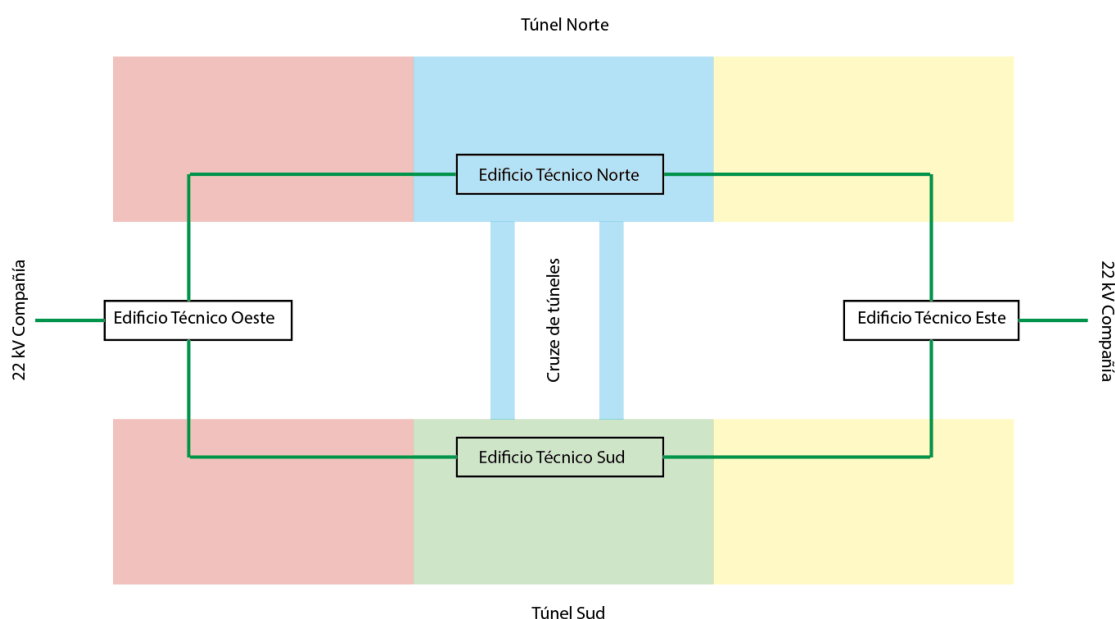


Imagen 1. Configuración de los túneles y el anillo que interconecta los Edificios Técnicos

4. Media Tensión

4.1. Descripción del sistema de media tensión

Para que se puedan alimentar todas las cargas finales de los túneles mediante el sistema de baja tensión, (5. Baja tensión, pág. 28), previamente necesitamos un sistema de media tensión que suministre corriente y que mediante unos transformadores reduzca los niveles de voltaje a los deseados, estos se encontraran en los edificios situados en las entradas de ambos túneles, llamados:

- Edificio Técnico Oeste
- Edificio Técnico Este

Además, para tener menores caídas de voltaje y para que el diseño de la arquitectura eléctrica sea más flexible se van a añadir dos edificios con transformadores en la parte más baja de cada túnel.

- Edificio Técnico Norte
- Edificio Técnico Sur

El diseño de la red de distribución de media tensión se llevará a cabo sobre la base de que un simple fallo puntual en cualquier elemento no resulte la pérdida o degradación de todo sistema de media tensión. Para que un sistema cumpla esta especificación, es necesario garantizar los criterios de redundancia e independencia.

En general, la redundancia consistirá en mejorar la fiabilidad del sistema mediante la duplicidad de elementos o equipos que tengan una función idéntica.

Para el concepto de independencia, que en algunos casos puede concebirse como "separación física", también hay que tener en cuenta dos aspectos:

- El concepto de independencia consiste en garantizar, para una función dada por elementos redundantes entre ellos, que no existen elementos comunes susceptibles de causar daños, es decir que un mismo fallo no afecte a dos elementos redundantes que pueden desarrollar la misma función.
- Por otra parte, la independencia debe garantizar que los diferentes elementos redundantes entre ellos no estén expuestos a los efectos destructivos que puede sufrir uno de estos elementos, es decir que si un

elemento redundante con otro tiene sufre un problema, este no afecte al otro elemento.

Por lo tanto, es importante señalar que dos elementos pueden considerarse redundantes entre sí, siempre que se garantice la independencia entre ellos en todas las circunstancias.

Los criterios de redundancia considerados en el sistema de media tensión son los siguientes:

- En cuanto al suministro de energía eléctrica por parte de la compañía eléctrica, se considerarán dos puntos de conexión independientes eléctricamente y geográficamente a la tensión de 22 kV, uno en cada edificio de la boca de los túneles.
- A nivel de distribución propia, se harán dos bucles uno por el túnel norte y otro por el túnel Sur y ambos caminos tendrán una capacidad de alimentación de las cargas del 100%, por si alguna de las ramas falla.

En caso de fallo o avería de ambos puntos de suministro de energía tanto del Edificio Técnico Oeste como del Edificio Técnico Este vamos a tener unos generadores diésel que van a poder soportar toda la energía de emergencia requerida por los túneles. Este sistema de energía de reserva consta de 4 generadores diésel en stand-by, (4.3. Energía de emergencia, pág. 27), y se encontrarán a lado del Edificio Técnico Oeste.

4.2. Modos de funcionamiento

Los dos edificios principales que suministrarán corriente están alimentados por la compañía eléctrica respectiva de la zona.

Antes de explicar los diferentes modos de funcionamiento en el que se va encontrar el sistema de media tensión, hay que comentar que para reducir el riesgo de que exista un cortocircuito en la barra colectora principal y falle en la alimentación de los edificios, se adoptará una medida de mitigación, separar el embarrado.

Además, se va a disponer de salas dedicadas y separadas físicamente, una para el embarrado principal de media tensión y otra para el embarrado de emergencia.

La barra colectora principal en cada edificio se divide en dos barras por la misma razón, con el fin de minimizar el impacto de tener una barra defectuosa y así prevenir posibles fallos. Cada barra de media tensión 1 y 2 se alimenta de forma separada y en el caso del Edificio Técnico Oeste, cada barra de Media tensión 1 y 2 se alimenta de forma separada desde la barra de emergencia (barra 3).

Este criterio también se aplica en todos los otros edificios técnicos, la barra colectora de Media Tensión también se divide en dos barras colectoras.

Se proponen dos configuraciones para la alimentación de los túneles:

1. Ambos edificios técnicos principales están en servicio, alimentando cada uno aproximadamente la mitad de los servicios eléctricos del túnel.
2. Un solo edificio está en servicio y alimenta el 100% de la carga de los túneles y el otro está en stand-by como energía de reserva en caso de cualquier problema.

Se ha decidido utilizar la primera configuración, aunque ambos métodos son igual de válidos, pero con el primero, habría un tiempo de reacción menor en alimentar los equipos, en caso de apagón o algún error en algunos de los puntos de alimentación ya que todos los circuitos estarían activos.

4.2.1. Modo Normal

En el modo de funcionamiento normal las diferentes barras colectoras e interruptores tendrán la siguiente configuración:

Las celdas (switchgear) de media tensión de entrada están en ON, de tal manera que la compañía eléctrica estará alimentando las dos salas con los diferentes embarrados.

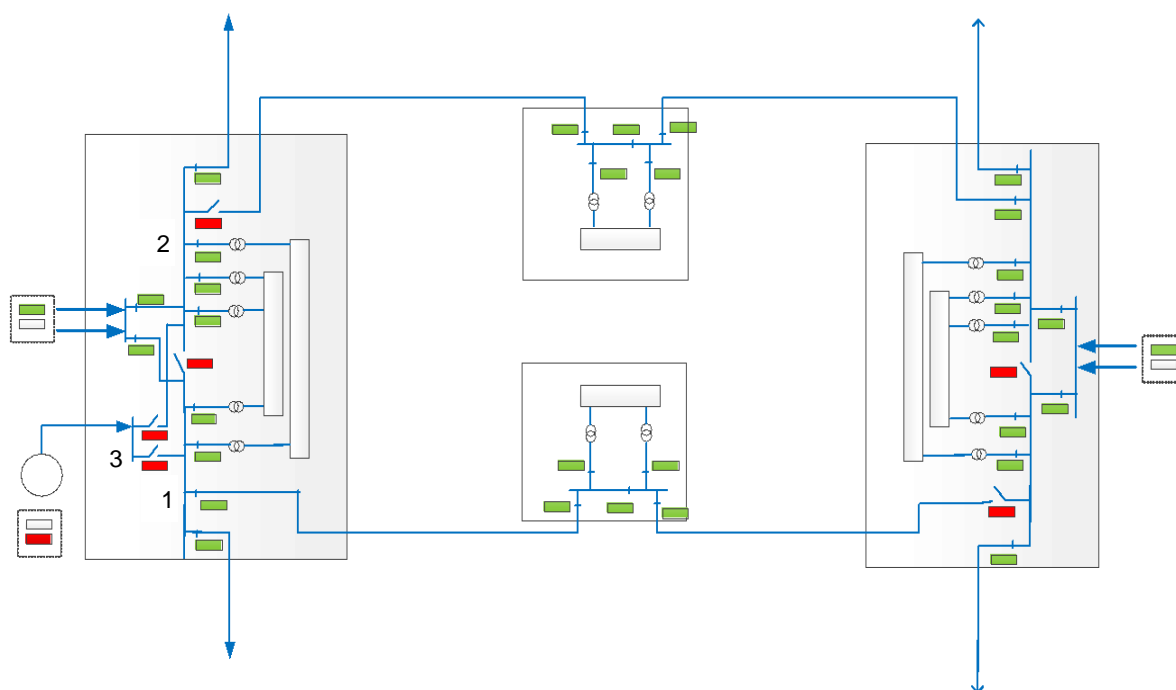
En la sala eléctrica de media tensión:

La barra colectora de emergencia no estará energizada ya que su disyuntor estará en OFF debido a que estamos en el modo normal de funcionamiento y no tiene que intervenir.

Estarán en ON tanto los disyuntores de las celdas que dan corriente a los diferentes transformadores, tanto los de la línea de 690V como los de la línea de 400V que estos alimentarán los cuadros principales de distribución de Baja Tensión, todos estos transformadores estarán en servicio alimentando la mitad de la barra colectora de baja tensión, de tal manera que nunca trabajarán en paralelo, se explicará más adelante las diferentes líneas de voltaje como los cuadros de distribución.

Estarán en ON los disyuntores, tanto del lado edificio este como del oeste, que alimentan las diferentes cargas exteriores de los túneles como podría ser el alumbrado del parking, etc. Sobre estas cargas exteriores hay que resaltar que recibirán alimentación desde dos sitios, uno desde cada barra colectora pero solo uno estará en carga el otro estará en modo stand-by, es decir actuará como respaldo si es necesario.

Por lo que respecta a los Edificios técnicos Norte y Sur hay que decir que el edificio norte será alimentado por el Edificio técnico Este y el Edificio Sur por el Edificio Oeste, de tal manera que la carga quedará repartida aproximadamente por la mitad. En los Edificios técnicos Norte y Sur los disyuntores estarán siempre en ON de tal manera que en cualquier imprevisto solo cerrando un disyuntor ya volveríamos a tener energía cerrandose uno de los dos bucles que interconectan los cuatro edificios técnicos.



Leyenda:



- 1. Embarrado 1
- 2. Embarrado 2
- 3. Embarrado emergencia
-  Disyuntor en OFF
-  Disyuntor en ON

Imagen 2. Configuración de la arquitectura del sistema de media tensión en modo normal

En esta imagen se puede ver la configuración en modo normal del sistema de media tensión, con la posición de los disyuntores y del camino de corriente explicada anteriormente. El embarrado 1 es el más cercano al bucle sud y el dos al bucle norte.

4.2.2. Modo Degradado 1

En el caso del modo degradado 1, sólo se considera un fallo en el sistema de Media Tensión. Es decir, sólo uno de los dos edificios donde se conecta la compañía eléctrica sufre una caída de tensión debido a que no se dispone de la fuente de energía eléctrica de la compañía por cualquier motivo.

Para hacer frente a este escenario, los dos alimentadores de media tensión independientes en el otro edificio garantizarán el suministro de energía al edificio que esté en fallo. Para intentar disminuir un defecto en uno de los alimentadores y aumentar la fiabilidad y redundancia, estos alimentadores estarán separados físicamente y existirán el bucle norte y el bucle sur, que juntan ambos edificios pasando por los Edificios Técnicos Norte y Sur respectivamente, para poder transmitir la energía. Hay que volver a remarcar que cada alimentador será capaz de alimentar y proporcionar toda la potencia necesaria para alimentar a todas las cargas finales.

En la *Imagen 3*, se muestra la configuración de la arquitectura de Media Tensión en modo de funcionamiento degradado 1, considerando que el Edificio Técnico Este es el que está fuera de servicio.

Cabe señalar que la siguiente configuración sería muy similar al modo de funcionamiento normal en la configuración dos, ya que el edificio Oeste es el encargado de suministrar todos los servicios eléctricos del túnel, por lo tanto, es el edificio Oeste el que actúa como fuente de alimentación.

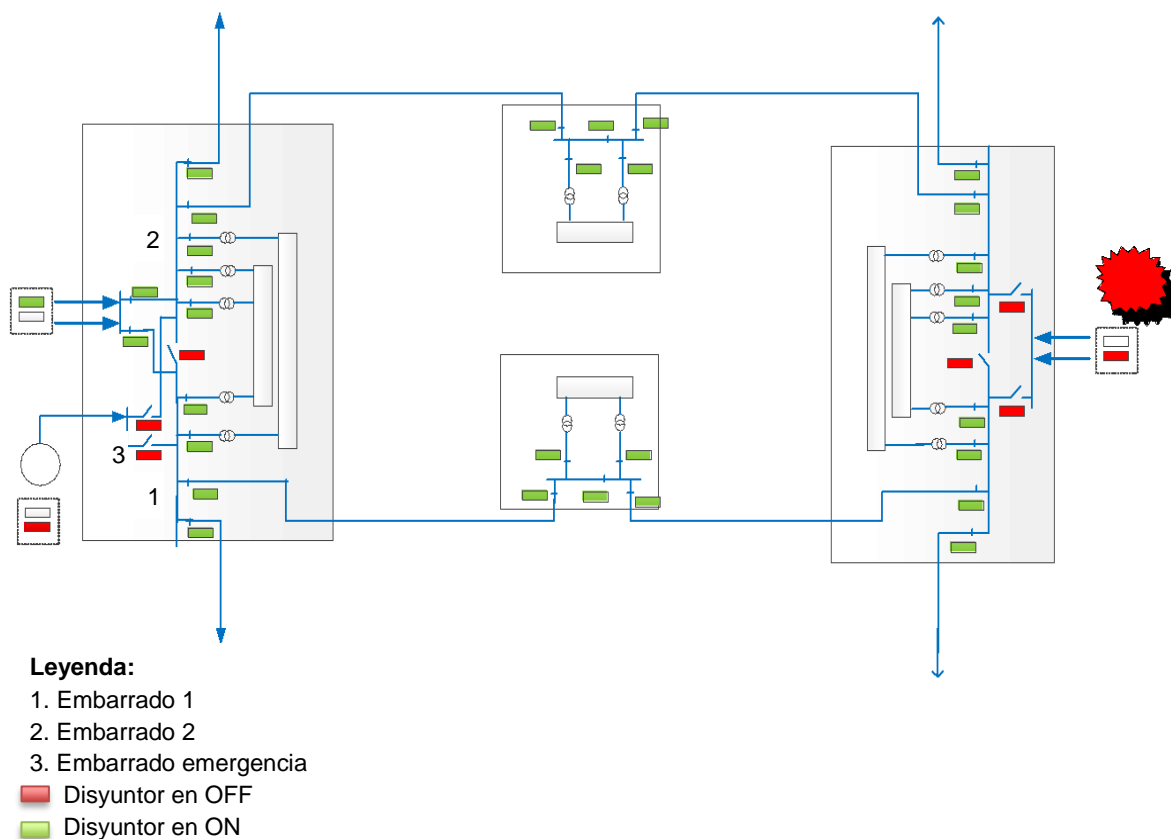


Imagen 3. Configuración arquitectura sistema de media tensión en modo degradado 1

El edificio Este es el que se encuentra fuera de servicio y el Oeste el que suministrará toda la energía suficiente. La posición de los distintos disyuntores para que el sistema siga funcionando y las cargas finales sigan la normalidad, es la observada en la imagen 3. La diferencia con la configuración en un modo normal consiste en que el disyuntor del Edificio Técnico Oeste del embarrado 2 con el edificio Norte está en la posición ON y el disyuntor del embarrado 1 del Edificio Técnico Este con el edificio Sur también está en ON de tal manera que el bucle queda cerrado y todas las cargas quedan alimentadas, por lo tanto, la barra colectora de Media Tensión del edificio norte y sur es alimentada por el Edificio Oeste.

En vez de un fallo en el edificio donde se conecta la compañía podría suceder que, si un cable del bucle de media tensión que interconecta ambos Edificios Técnicos está fuera de servicio por cualquier motivo, el bucle en cuestión permanecerá fuera de servicio, con ambos extremos desconectados y conectados a tierra, este bucle ya no puede utilizarse como sistema de reserva, pero la reserva eléctrica será realizada por el otro bucle de media tensión, como se puede ver en la *imagen 4*. Por lo tanto, la confiabilidad y disponibilidad del sistema de suministro de energía permanece idéntica a la existente antes de la falla, sin causar ningún corte de voltaje en el sistema, como se puede ver en la imagen, el circuito queda totalmente cubierto.

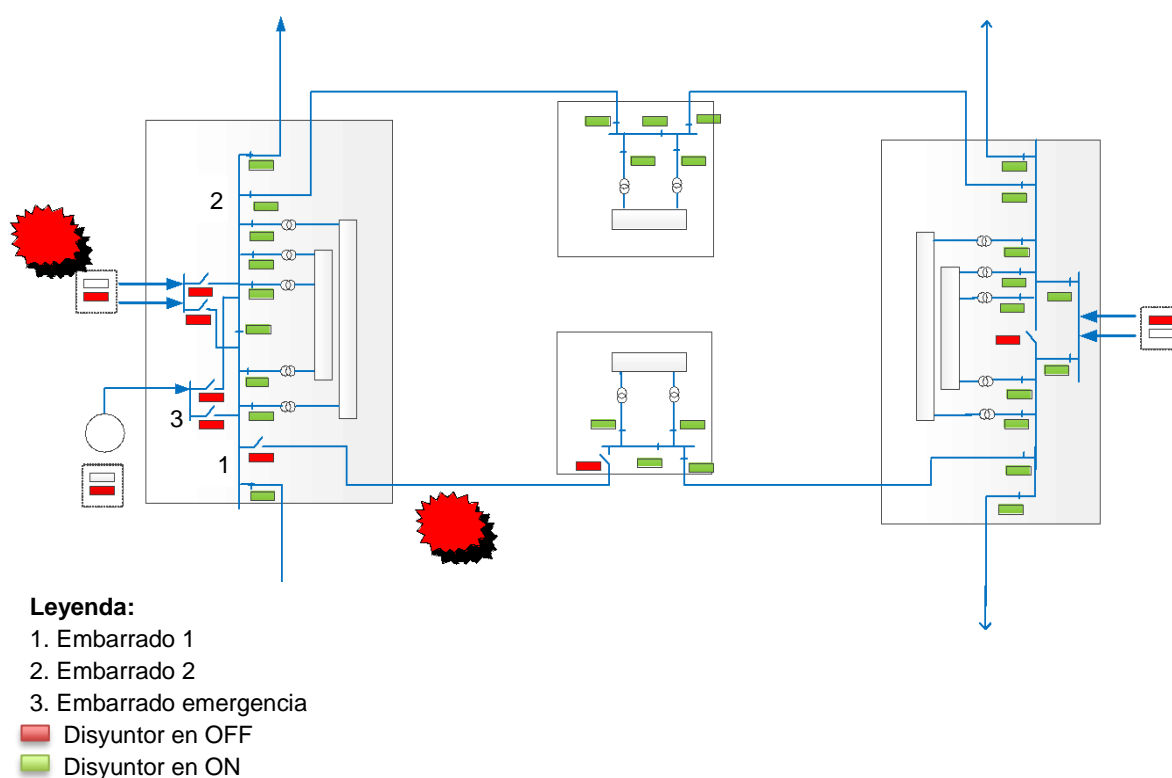


Imagen 4. Configuración arquitectura sistema de media tensión en modo degradado 1

Podemos ver que en este caso es el Edificio Este el que alimenta a los túneles, ya que en el otro edificio no hay conexión, en este caso, también uno de los cables de los bucles está fuera de servicio, por lo tanto se aísla abriendo los disyuntores y se conecta a tierra, por el contrario, el disyuntor de Edificio Técnico Oeste del embarrado dos con el edificio Norte está en la posición ON y el disyuntor del embarrado uno del Edificio Técnico Este con el edificio Sur también está en ON, además para que el bucle quede cerrado y todas las cargas quedan alimentadas, hay que cerrar el disyuntor que une ambas barras colectoras en el edificio Oeste.

Cabe contemplar el caso en que una barra colectora se averíe, si esto sucediera, debe aislarse eléctricamente y mantenerse fuera de servicio. El impacto en los servicios de baja tensión será mínimo debido a las redundancias en los transformadores. En las imágenes 5 y 6 se muestra la arquitectura en caso de tener la barra colectora dos en Edificio Técnico Oeste defectuosa y una barra colectora defectuosa en el Edificio Norte.

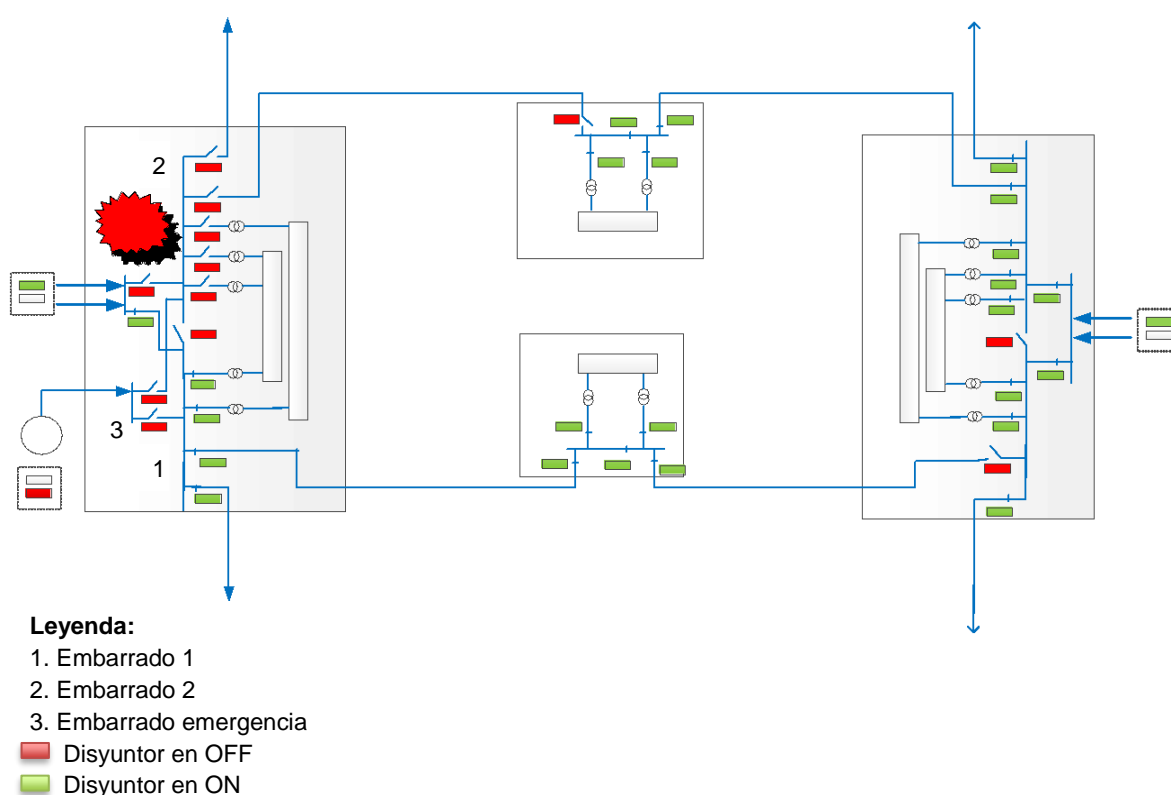


Imagen 5. Configuración arquitectura sistema de media tensión en modo degradado 1.

En este caso como se puede ver en la Imagen 5, la parte del bucle que conecta el Edificio Oeste con el Edificio Norte no circula corriente ya que el embarrado dos está fuera de servicio, pero esto no implica que las cargas no queden alimentadas ya que un solo transformador en cada nivel de voltaje es suficiente para soportar toda la carga, y como el diseño de la red de media tensión divide y separa los diferentes transformadores en las dos barras colectoras de cada edificio, el túnel seguiría en servicio.

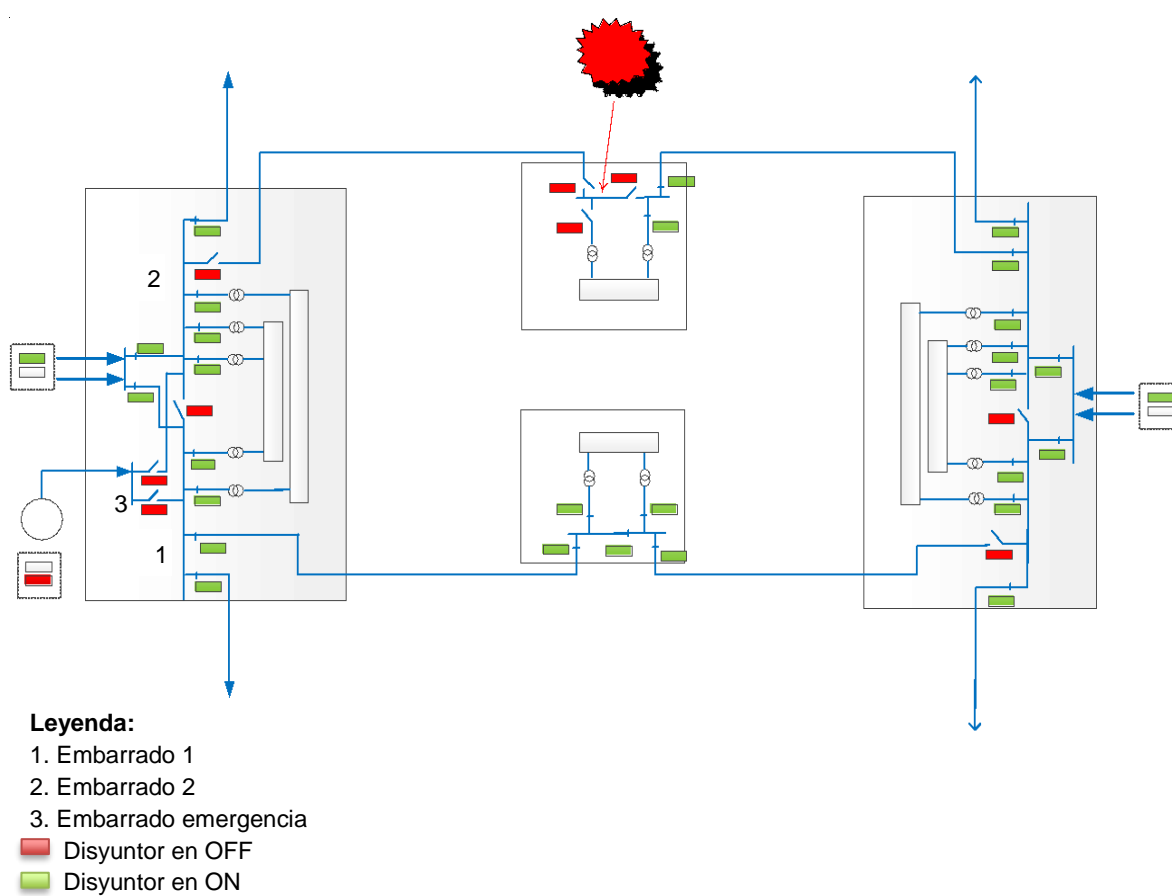


Imagen 6. Configuración arquitectura sistema de media tensión en modo degradado 1

Lo mismo sucede en este segundo caso donde la barra colectora que no funciona está en uno de los dos edificios del punto bajo del túnel, el edificio norte o el edificio sur. Como los embarrados de estos edificios tienen dos posibles entradas de alimentación, con abrir el disyuntor que une ambas barras, para separar la defectuosa y cerrar el bucle, el túnel funcionará en su normalidad.

4.2.3. Modo Degradado 2

En caso, se contempla la pérdida total de la fuente de alimentación en ambos edificios técnicos, es decir, el modo degradado 2, considera una situación donde exista una doble avería en el sistema de media tensión, por lo tanto, ambas subestaciones se encuentran en situación de caída de tensión debido a que la fuente de la compañía eléctrica no está disponible en ninguna subestación, tal y como se muestra en la siguiente imagen 7.

Para hacer frente a este escenario, un sistema de alimentación de reserva suministrará toda la energía requerida por el túnel. El sistema de respaldo está formado por un conjunto de cuatro generadores de reserva ubicados al lado del Edificio Técnico Oeste.

El sistema de emergencia es capaz de suministrar el 100% de la demanda de energía del túnel y garantizar el correcto funcionamiento del túnel en caso de fallo total (caída de tensión o apagón) de ambas conexiones a la red. La autonomía de los generadores diésel garantizará 24 horas de funcionamiento normal de los túneles.

Hay que tener en cuenta que cuando se ponga en marcha el sistema de emergencia se necesitará de una interfaz tanto en media tensión como en baja tensión para que el proceso de reconexión del sistema se vea como una rampa de carga continua creciente y por lo tanto haya una conexión eficaz y segura.

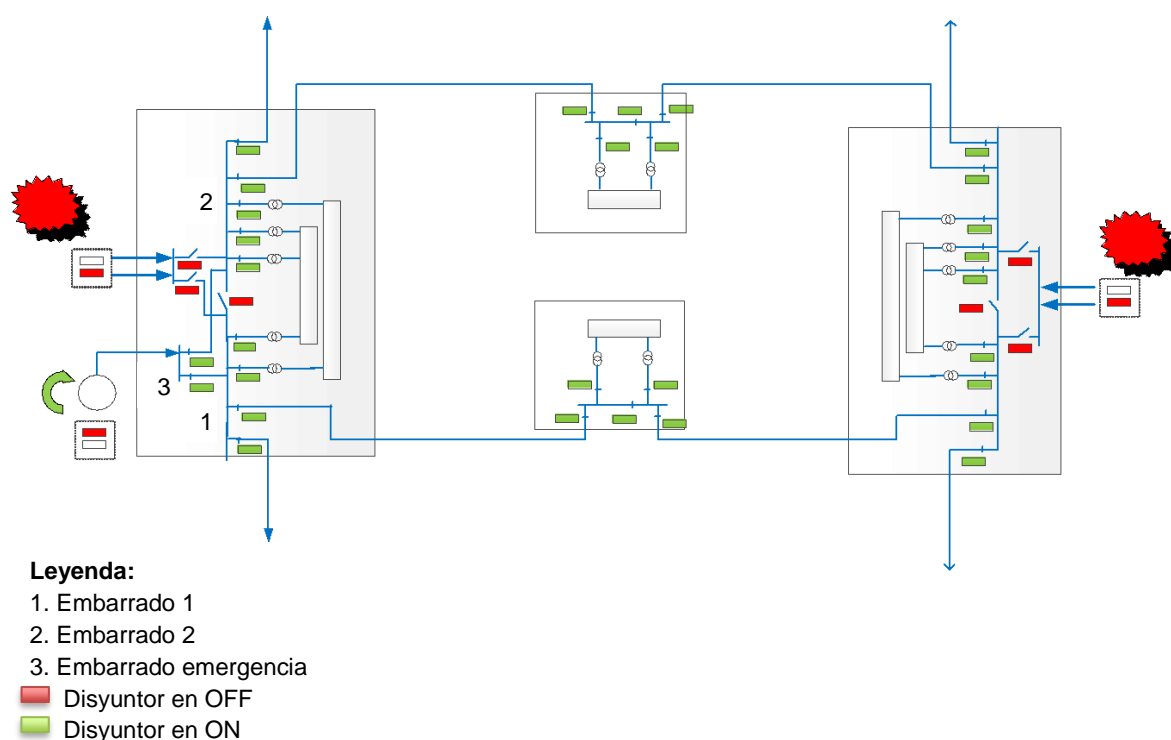


Imagen 7. Configuración arquitectura sistema de media tensión en modo degradado 2

En este caso, podemos ver cómo en ambos edificios técnicos donde la compañía eléctrica se conecta estarían fuera de servicio y consecuentemente los túneles no tendrían energía, cuando esto pasara el sistema de energía de reserva se activará y las cargas del túnel podrán seguir funcionando con normalidad, para que esto suceda los disyuntores del embarrado de emergencia se cierran, poniéndose en la posición de ON, el disyuntor del Edificio Técnico Oeste del embarrado dos con el edificio Norte quede en la posición ON y el disyuntor del embarrado 1 del Edificio Técnico Este con el edificio Sud también quede en ON de tal manera que el bucle queda cerrado y todas las barras colectoras quedan energizadas.

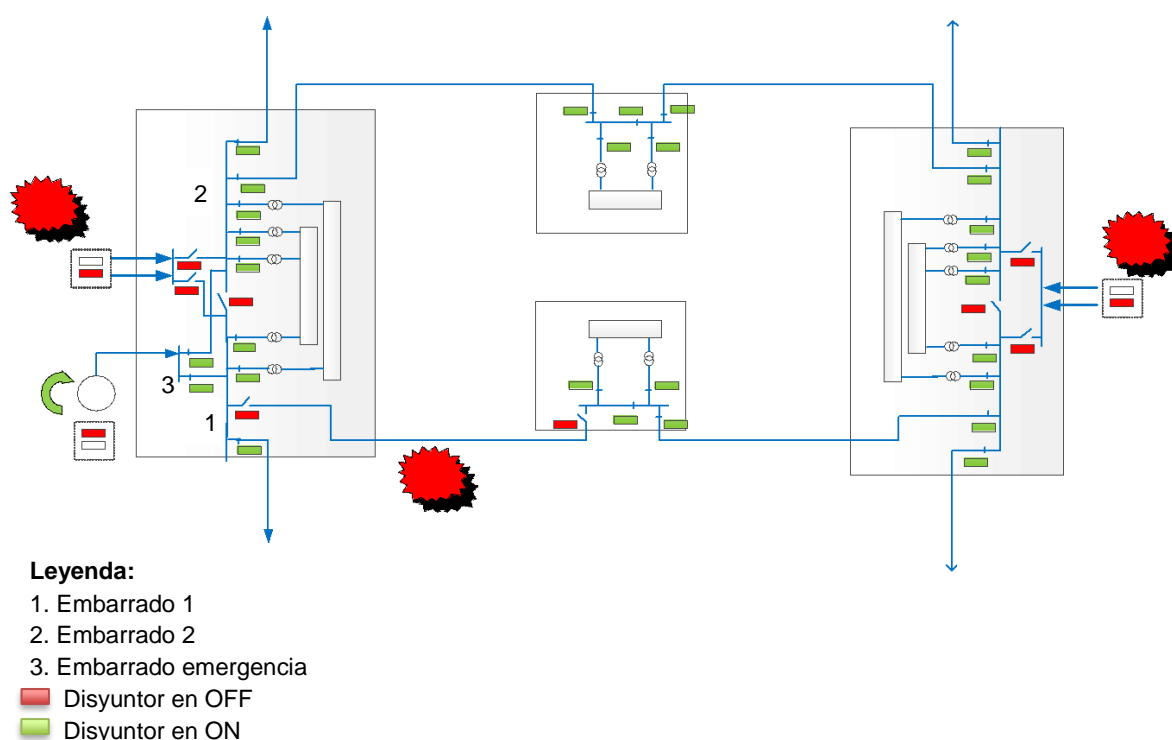


Imagen 8. Configuración arquitectura sistema de media tensión en modo degradado 2

En este segundo caso del modo degradado 2, podemos ver cómo en ambos edificios técnicos donde la compañía eléctrica se conecta quedarían fuera de servicio y consecuentemente los túneles no tendrían energía y además uno de los cables del bucle también está fuera de servicio, cuando esto pasa, primeramente, como en casos anteriores, el bucle en cuestión permanecerá fuera de servicio y por lo tanto habrá que tener ambos extremos desconectados y conectados a tierra, por lo tanto este bucle ya no puede utilizarse como sistema de reserva, pero el camino eléctrico será realizado por el otro bucle. El sistema de energía de reserva se activará y las cargas del túnel podrían seguir funcionando con normalidad, para que esto suceda los disyuntores del embarrado de emergencia se cierran, poniéndose en la posición de ON, el disyuntor del Edificio Técnico Oeste del embarrado dos con el edificio Norte quede en la posición ON y el disyuntor del embarrado 1 del Edificio Técnico Este con el edificio Sur también quede en ON de tal manera que el bucle queda cerrado y todas las barras colectoras quedan energizadas.

4.3. Energía de emergencia (Generadores)

En caso de pérdida de ambas subestaciones (Edificio Técnico Oeste y Edificio Técnico Este), una fuente de alimentación de emergencia alimentará los sistemas del túnel. Esta energía de emergencia se suministrará a través de generadores diésel de reserva, que tendrán una autonomía de 24 horas.

El sistema generador estará compuesto por cuatro 4 generadores de reserva trabajando en paralelo, los cuales podrán suministrar la carga demandada del túnel. La configuración seleccionada será la de generadores de 4x2500 kVA situados en el exterior cerca del Edificio Técnico Oeste.

Estos generadores tendrán el tamaño adecuado para el escenario más exigente. La potencia de salida será de 0,40 kV y los transformadores elevadores situados en el Edificio Oeste la elevarán a 22 kV.

Se considerará el escenario de operación más exigente de los túneles para dimensionar estos generadores. Este peor escenario ocurre cuando hay fuego en uno de los tubos del túnel y los sistemas de extinción de incendios se activan, esta situación es la de más demanda de energía en los túneles.

En la siguiente tabla se muestra el escenario de carga máxima, así como la carga aproximada del escenario de operación normal, se ha usado un factor de potencia de 0.9.

Edificio Técnico	Peor situación [kVA]	Situación Normal [kVA]
Oeste	4450	2675
Este	4280	2505
Norte	480	395
Sur	480	395

TOTAL [kVA]	5970	9690
-------------	------	------

Tabla 1. Resumen de las potencias según edificio técnico

Por lo tanto, con 4 generadores de 2500 kVA cubren la totalidad de la potencia demandada en el escenario más crítico, ya que 4×2500 kVA (10 MVA) cubre la potencia de 9690 kVA.

Hay que decir que también se había planteado la opción de se consideraban 3 generadores (3×3300 kVA) pero las buenas prácticas recomiendan no usar los generadores que tengan una potencia nominal superior a 2500 kVA.

Los siguientes puntos apoyan el nuevo diseño frente al anterior:

- Los generadores de 3300 kVA no están estandarizados y son mucho más caros que los de 2500 kVA (alrededor del 50%).
- La salida de 0,40 kV no es la solución más adecuada para los generadores de tal potencia, ya que en 0,40 kV el amperaje es tan alto que se necesitan muchos cables de BT por fase y las conexiones al transformador (0,4/22 kV) son más complicadas.
- Este mayor número de cables encarece también las obras civiles.

5. Baja Tensión

5.1. Descripción del sistema de Baja Tensión

Para que la energía proveniente del sistema de media tensión pueda llegar a las cargas con el voltaje deseado se van a utilizar diferentes transformadores, cada tipo de transformador reducirá el voltaje de la compañía eléctrica al voltaje deseado para poder alimentar a las cargas existentes en los túneles.

Hay diferentes voltajes dentro del rango de sistemas de baja tensión:

- 690V AC, 3P+N+PE, 50Hz: Este voltaje se utilizará para alimentar al sistema de ventilación de los túneles, será un voltaje en corriente alterna con tres fases, un neutro y un cable de puesta a tierra.
- 400V AC, 3P+N+PE, 50Hz: Este voltaje se utilizará para la mayoría de cargas eléctricas como puede ser bombas, toma de corrientes, etc. Será un voltaje en corriente alterna con tres fases, un neutro y un cable de puesta a tierra.
- 230V AC, P+N+PE, 50Hz: este voltaje se utilizará para cargas eléctricas monofásicas como por ejemplo en iluminación, toma de corrientes, etc. Será un voltaje en corriente alterna con tres fases, un neutro y cable de puesta a tierra.
- 110V DC: Este voltaje que a diferencia de los otros es en corriente continua, se utilizará para alimentar al motor que permite accionar los disyuntores eléctricos de media tensión. Este a diferencia de los otros será un voltaje en corriente continua

5.2. Sistema de baja tensión de 690V

Los centros de control (armarios de baja tensión) de 690V estarán alimentados por tres transformadores de potencia que reducirán el voltaje de 22 kV a 0,6 kV, cada uno de estos transformadores estará capacitado para soportar toda la carga de potencia entera. La barra colectora estará apropiadamente seccionada y se considerarán disyuntores para evitar la alimentación simultánea de dos transformadores a una misma carga y poder mantener la alimentación en caso de emergencia.

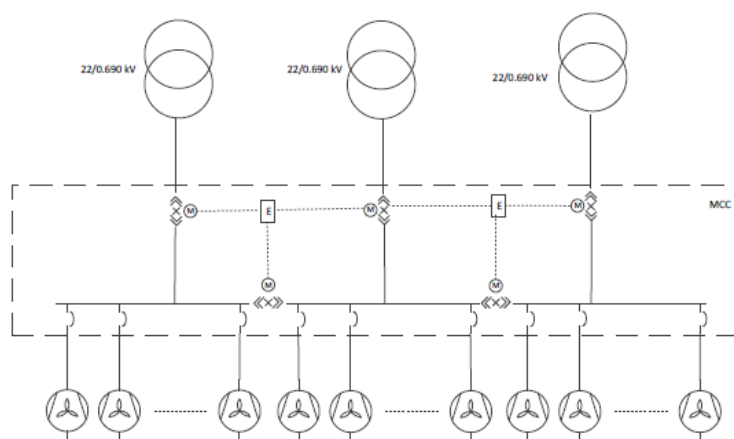


Imagen 9. Esquema funcionamiento sistema de baja tensión de 690V

Los centros de control de 690V principalmente suministrarán los ventiladores de los túneles.

Se propone que todas esas cargas que estén lejos del cuadro principal de donde se distribuye la corriente utilicen también la línea de 690V AC en vez de la de 400V AC para reducir pérdidas de energía, caída de voltaje y poder disminuir el calibre de los cables.

5.3. Sistema de Baja tensión de 400V

La línea de baja tensión de 400V se utilizará para alimentar la mayoría de cargas finales, pero esta línea previamente pasará por tres cuadros de distribución diferentes, explicados a continuación:

Cuadro Principal de distribución (MDB): El cuadro de distribución principal será alimentado por 2 transformadores, que ambos por separado pueden soportar toda la carga. La barra colectora estará adecuadamente instalada para evitar que exista una alimentación simultánea de los dos transformadores a una misma carga.

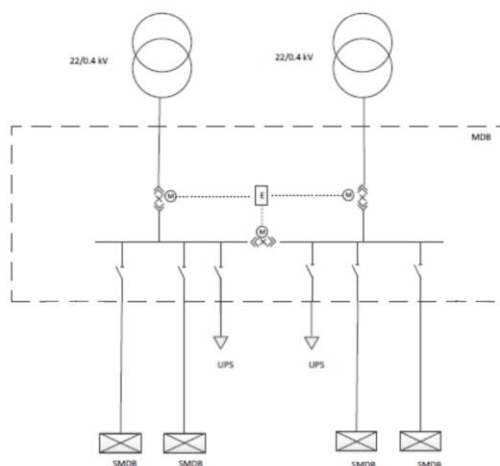


Imagen 10. Esquema funcionamiento sistema de baja tensión de 400V (MDB)

Cuadro Secundario de distribución (SMDB): El cuadro de distribución secundario recibe la potencia del cuadro principal y la distribuye a los otros cuadros de distribución que alimentarán a las diferentes cargas finales. A veces, alimentan directamente a algunas cargas debido a la cercanía.

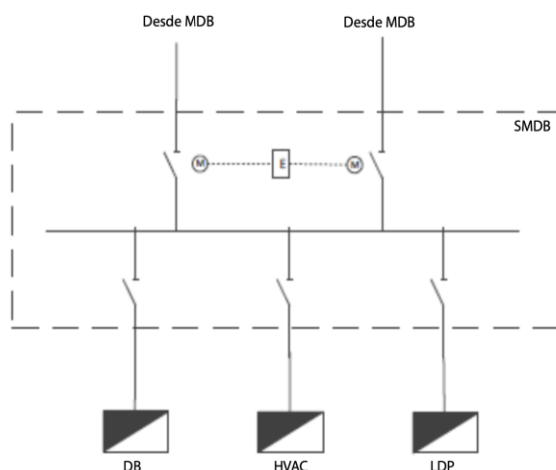


Imagen 11. Esquema funcionamiento sistema de baja tensión de 400V (SMDB)

Cuadros de distribución (DB): Estos cuadros distribuyen la potencia a los diferentes circuitos donde se sitúan las cargas finales, como equipos de emergencia, luminarias, etc.

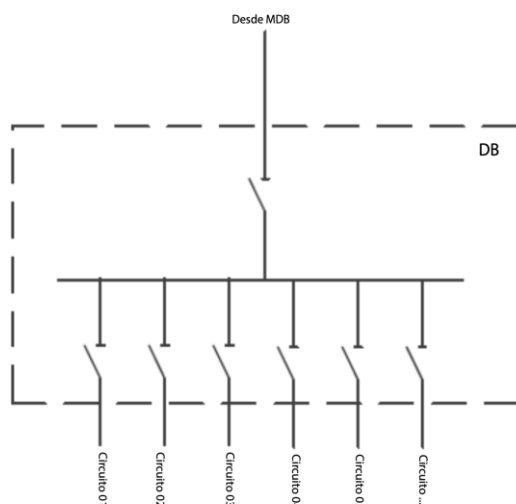


Imagen 12. Esquema funcionamiento sistema de baja tensión de 400V (DB)

Para poder abastecer ambos túneles en su totalidad vamos a disponer de 4 centros de transformación, es decir de cuatro edificios donde habrá un cuadro de distribución principal.

5.4. Clasificación de las cargas

Se van a diferenciar las cargas a alimentar según su importancia en tres tipos:

- Cargas de emergencia
 - Luces de emergencia
 - Sensores de fuego
 - ...
- Cargas eléctricas (Críticas)
 - SOS túnel
 - Sistema inteligente de transporte (ITS)
 - ...
- Cargas Normales
 - Todas las otras cargas que puedan existir en los túneles serán consideradas cargas normales como podrían ser los enchufes, las luminarias, la ventilación de los túneles, el aire acondicionado, etc.

5.5. Distribución de la corriente en baja tensión

El diseño de la distribución de la corriente, es decir de la energía, en baja tensión va a ser dual, es decir los cuadros de distribución secundarios, se van a alimentar por dos vías, por lo tanto, existirá redundancia para que exista más seguridad, además, se colocará un interlock como medida de seguridad. Con este diseño se alimentarán tanto cargas normales como las cargas de emergencia y críticas, pero en estos dos últimos casos una de las vías provendrá desde el SAI online (todo el rato conectado) de 90 min de autonomía.

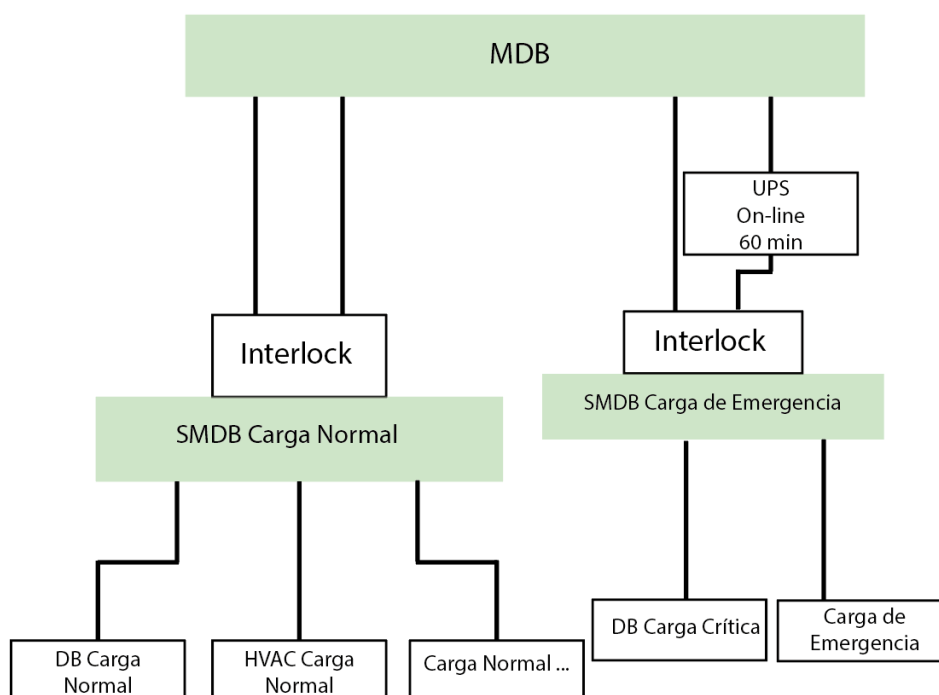


Imagen 13. Esquema distribución de la corriente en baja tensión

5.6. Energía de Emergencia (SAI)

El sistema de alimentación ininterrumpida servirá para poder dar corriente a las cargas de emergencia y críticas en el supuesto caso de que hubiera un fallo en la distribución de corriente de los túneles.

Se utilizarán SAI (sistema alimentación ininterrumpida) Online, es decir que irán permanentemente conectados a la corriente y a la carga, de 60 min de autonomía.

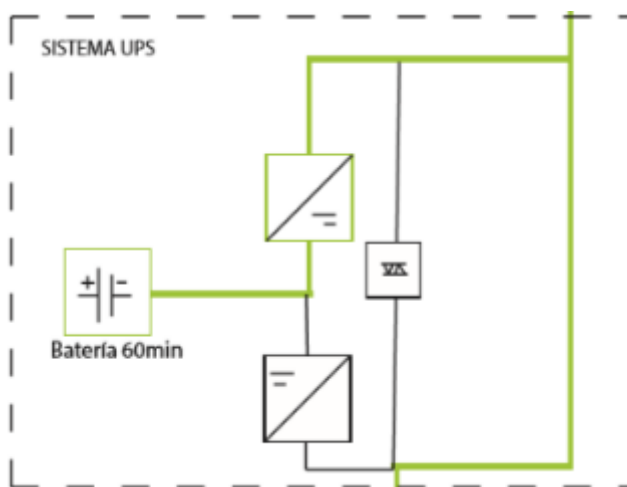


Imagen 14. Esquema del SAI.

Como se puede observar el SAI está formado por un banco de baterías, un rectificador que convierte la corriente alterna en continua para poder cargar las baterías, y un ondulador que convierte la corriente continua en alterna para alimentar a las diferentes cargas de emergencia que alimentara el SAI. También está compuesto por un by-pass, para disponer de un camino de corriente auxiliar directo desde la entrada hasta la salida del sistema de SAI.

5.7. Modos de Funcionamiento

En este apartado se explicarán los posibles modos de funcionamiento que se van a poder encontrar la línea de baja tensión, tanto en la de 690V como en la de 400V para que en ningún momento las cargas consideradas como de emergencia o críticas dejen de ser alimentadas.

Hay que recalcar que el sistema ya tiene redundancia en suministro de la energía. (transformadores y generador diésel, por si acaso, en Media Tensión).

5.7.1. Modo Normal

Sistema de 400V AC

Durante el funcionamiento normal y esperado de los túneles, la alimentación de las cargas deberá ser compartida entre los dos transformadores.

Todos los cuadros de distribución secundarios que sirvan para alimentar a cargas normales tendrán una vía de alimentación normal y otra en stand-by, por si la primera fallará por cualquier motivo.

Todos los cuadros de distribución secundarios que sirvan para alimentar cargas de emergencia tendrán que ser alimentadas por la vía que aparece el SAI, como explicado anteriormente, y la otra vía, en stand-by en funcionamiento normal, se utilizará como alimentador en situaciones de sustitución o reparación del SAI.

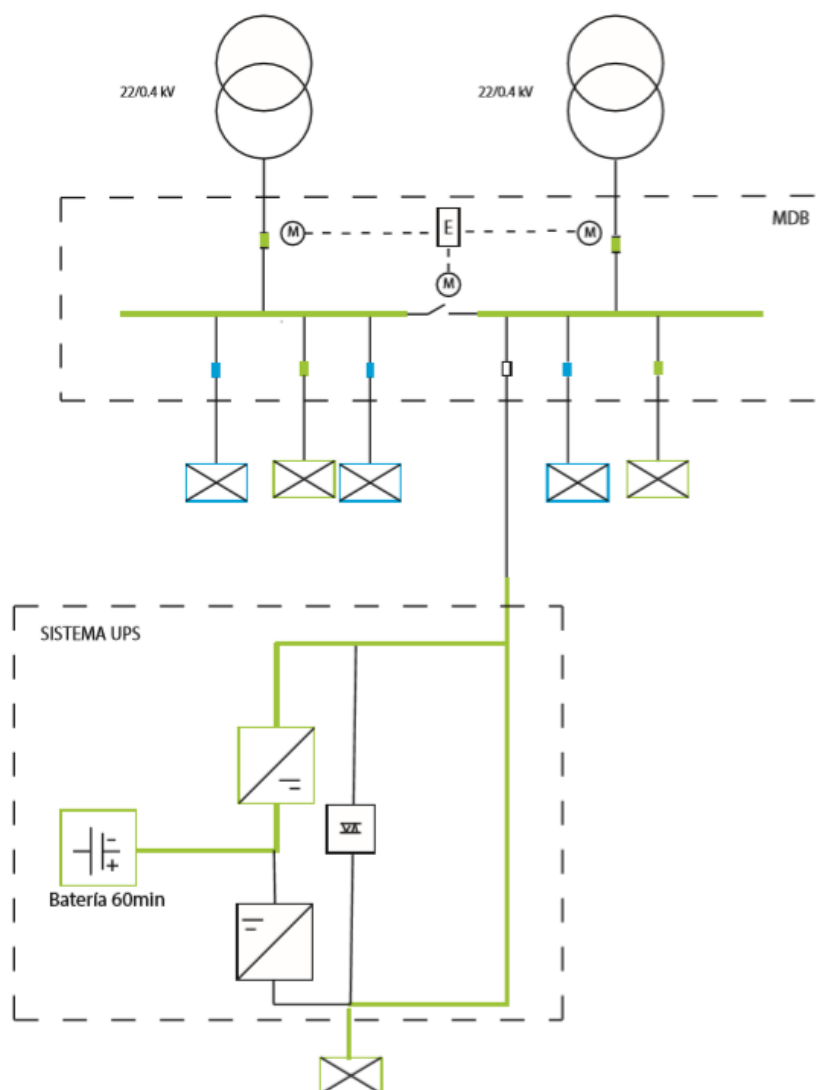


Imagen 15. Esquema distribución de la corriente modo normal el sistema de 400V.

Como podemos ver, en el sistema de 400V AC en modo normal la carga se reparte entre los dos transformadores, y las cargas que se consideran de emergencia primeramente pasan por el sistema UPS y a la vez van cargando el banco de baterías.

Sistema de 690V AC

El mismo sistema se utilizará en la línea de 690V, los tres transformadores compartirán la carga durante el funcionamiento normal y esperado de los túneles. Hay que remarcar que el sistema de 690V AC alimenta a los ventiladores, y estos solo tienen una vía de alimentación, es decir no hay redundancia en los caminos, pero en cambio tienen 3 transformadores donde un solo puede soportar la carga total, es decir tienen redundancia en fuentes de alimentación.

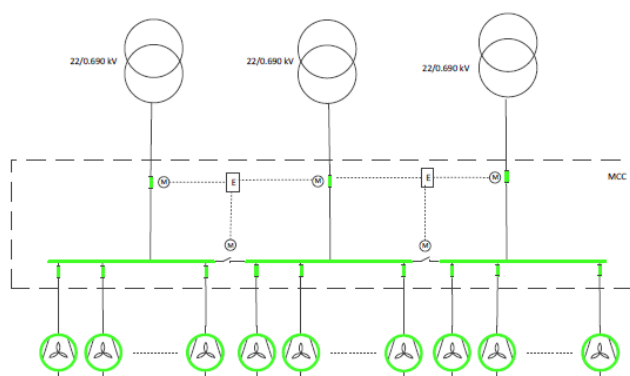


Imagen 16. Esquema distribución de la corriente en modo normal el sistema de 690V.

La carga se reparte entre los 3 transformadores, y existe posibilidad de modificar el camino de la alimentación mediante los diferentes disyuntores.

5.7.2. Modo Degradado (Fallo Transformador)

Sistema de 400V AC

Cualquier transformador en el sistema de 400V tiene que ser capaz de soportar toda la carga para que de tal manera si existe algún fallo en algún transformador se cierre el circuito y un solo transformador pueda hacer funcionar los túneles en su normalidad.

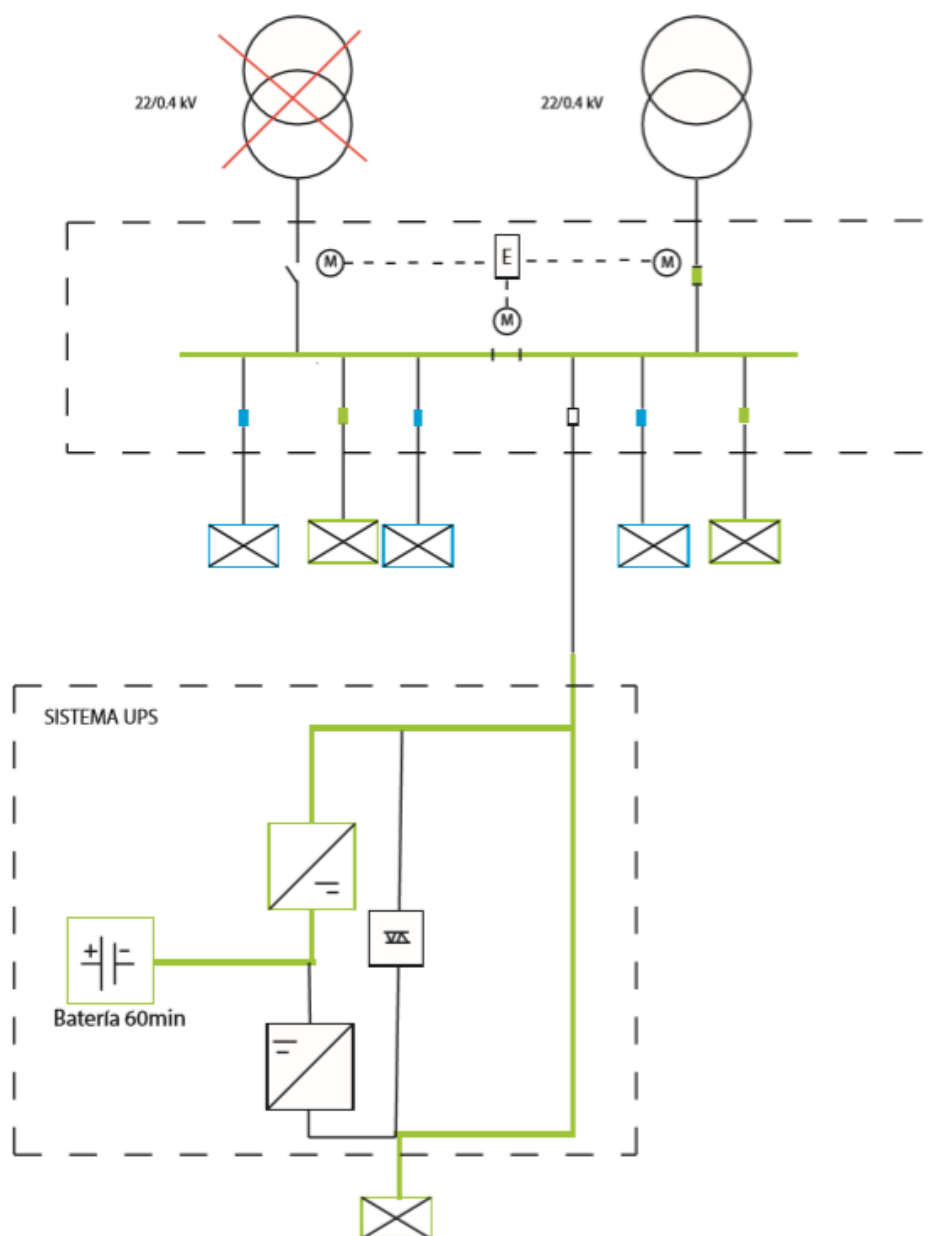


Imagen 17. Esquema distribución de la corriente en modo degradado en el sistema de 400V.

En esta imagen se puede observar como el transformador 1 queda fuera de servicio y es el transformador 2 quien soporta toda la carga, esto se consigue cerrando el disyuntor que separa el cuadro de distribución y abriendo el del transformador 1, de tal manera que este queda aislado.

Sistema de 690V AC

Igual que en el sistema de 400V, cualquier transformador tiene que ser capaz de soportar toda la carga por el mismo en la línea de 690V AC de manera que si existe algún fallo que impida el funcionamiento de uno o dos transformadores automáticamente se cierre el circuito y es único transformador alimente toda las cargas y los túneles funcionen en su normalidad.

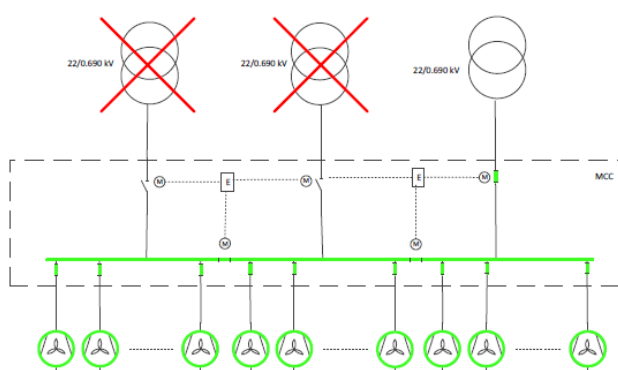


Imagen 18. Esquema distribución de la corriente en modo degradado en el sistema de 690V.

En este esquema eléctrico podemos ver como dos de los tres transformadores que alimentan el circuito están fuera de servicio y como uno de ellos es suficiente para poder alimentar todas las cargas, pero para eso hay que cerrar los disyuntores que conectan los diferentes embarrados y abrir los de los transformadores que están fuera de servicio para poder aislarlos.

5.7.3. Modo emergencia

Sistema de 400V AC

En el hipotético caso que ambos transformadores fallaran, las cargas consideradas como de emergencia necesitan seguir alimentadas para poder garantizar la seguridad de los túneles, para eso hay un sistema de SAI que suministrará corriente a estas cargas durante un periodo máximo de 60 min.

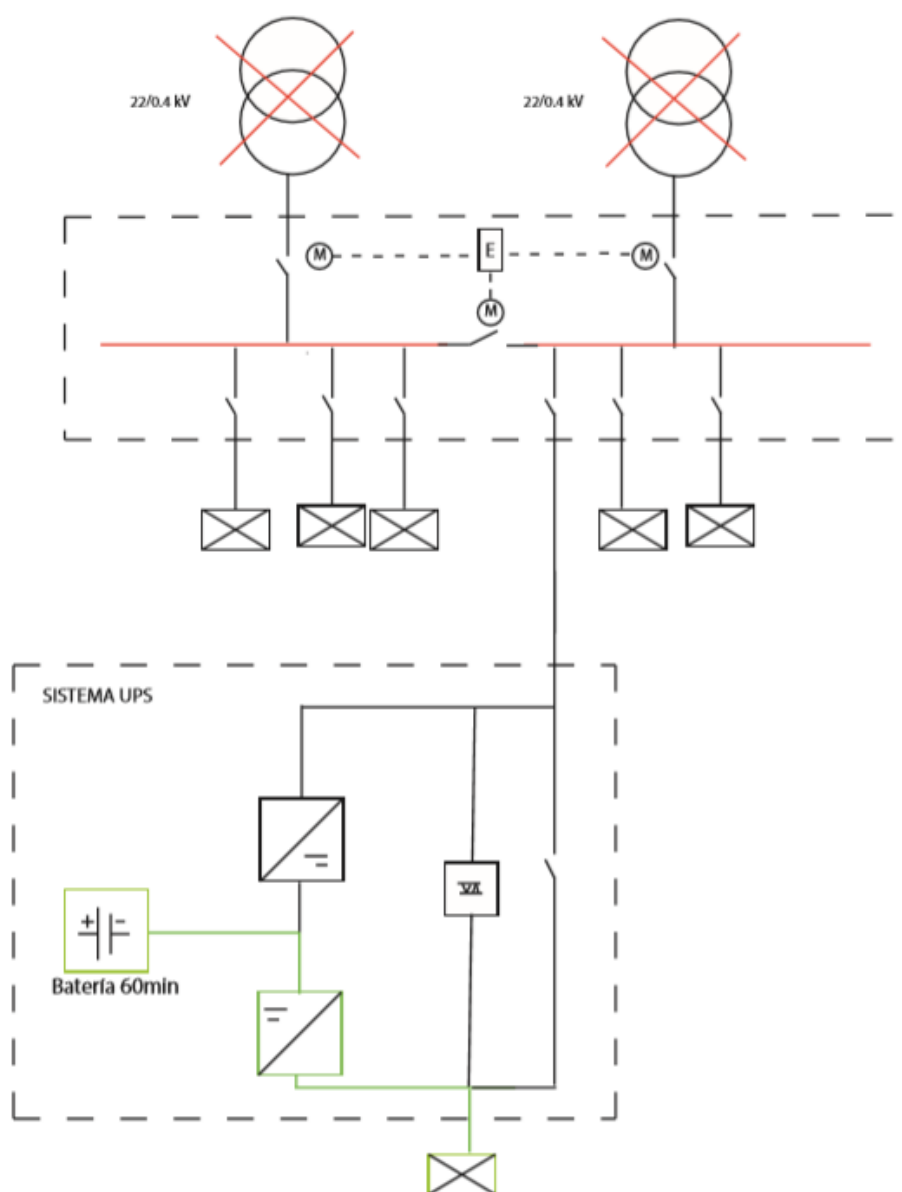


Imagen 19. Esquema distribución de la corriente en modo emergencia en el sistema de 400V.

En la *imagen 19* la energía proviene directamente desde el sistema de UPS, ya que todos los transformadores están fuera de servicio, y consecuentemente las únicas cargas que se alimentan son las de emergencia.

6. Dimensionamiento transformadores MT/BT

Una vez determinados los transformadores hay que dimensionarlos y para ello, hay que tener en cuenta la potencia que van a consumir las diferentes cargas en ambos túneles, es decir la ventilación, iluminación, comunicaciones, PCI, etc., que se alimentan en baja tensión en cada uno de los túneles. Estos consumos se resumen en la tabla 3 y han sido subministrados por la empresa.

Se han considerado dos posibles escenarios, un escenario normal y otro escenario donde la demanda de potencia del túnel sea la máxima, este escenario es el de fuego en alguno de los túneles y se activan los sistemas contraincendios y además uno de los edificios técnicos donde se conecta la compañía está fuera de servicio.

LOCALIZACIÓN	CARGA TOTAL (NORMAL) (kVA)	CARGA MAX. TOTAL (FUEGO) (kVA)	TRANSFORMADORES (kVA)
Carga túnel Oeste (690V)	1060	1700	3 x 2000 kVA (22/0,69 kV)
Carga túnel Este (690V)	1060	1700	3 x 2000 kVA (22/0,69 kV)
Edificio técnico Oeste (400V)	1615	2750	2 x 3150 kVA (22/0,40 kV)
Edificio técnico Este (400V)	1445	2580	2 x 3150 kVA (22/0,40 kV)
Edificio técnico Norte (400V)	395	480	2 x 500 kVA (22/0,40 kV)
Edificio técnico Sur (400V)	395	480	2 x 500 kVA (22/0,40 kV)
Total (KVA)	5970	9690	

Tabla 2. Valor de las cargas y dimensionamiento de los transformadores

Se han dimensionado los transformadores para que puedan asumir un 25% más de la demanda en el peor escenario. Esto se hace para que los túneles puedan asumir futuras ampliaciones.

Como se puede ver en la *Tabla 2* se utiliza diferente criterio de redundancia en la línea de 690 V que en la de 400 V, en la primera utilizamos 3 transformadores ya que la línea de 690 V mayoritariamente alimenta los ventiladores del túnel y en un caso de fuego estas cargas son más críticas (humo, etc.) y es por eso que se consideran más transformadores.

Para resumir, vamos a tener los siguientes transformadores por cada túnel:

- 3 x 2000 kVA (22/0,69 kV)
- 2 x 3150 kVA (22/0,40 kV)
- 2 x 500 kVA (22/0,40 kV)

ESCENARIO	CARGA REQUERIDA EN E.T.O. (kVA)	CARGA REQUERIDA EN E.T.E. (kVA)
Condiciones Normales (Ambos E. Técnicos en servicio)	2675	2505
Condiciones Normales (Solo E. Técnico Oeste en servicio)	5180	0
Condiciones Normales (Solo E. Técnico Este en servicio)	0	5180
Fuego en los túneles (Ambos E. Técnico en servicio)	4450	4280
Fuego en los túneles (Solo E. Técnico Oeste en servicio)	8730	0
Fuego en los túneles (Solo E. Técnico Este en servicio)	0	8730
Demanda eléctrica (kVA)	8730	8730
Generadores de emergencia	10 MVA	

Tabla 3. Distribución de la alimentación a los túneles según el escenario.

E.T.E. = Edificio Técnico Este
E.T.O. = Edificio Técnico Oeste

7. Cálculo de los cables de Media Tensión

En este apartado se calculará la sección de cables necesaria. El método para determinar la sección de los cables conductores en media tensión consiste en:

- Determinar la máxima corriente I_B de las cargas a alimentar
- Determinación del área de la sección S_1 que cumple con el calentamiento del cable en condiciones normales de funcionamiento. Para ello es necesario conocer:
 - Las condiciones reales de instalación del sistema de cableado y, por consiguiente, el factor de corrección global f ,
 - Las capacidades de transporte de corriente de los diferentes tipos de cable en condiciones de instalación estándar
- Comprobar la caída tensión

7.1. Dimensionamiento Sección S_1

Cables hacia las celdas de Media Tensión

En caso de pérdida de una conexión en uno de los Edificios Técnicos, el otro debe tomar la carga eléctrica completa. Esto significa que cada conexión de servicio público debe estar diseñada para suministrar 10 MVA. Por lo tanto, la corriente esperada será:

$$IB = \frac{P [kVA]}{V [kV] \sqrt{3}} \qquad IB = \frac{10000 [kVA]}{22 [kV] \sqrt{3}} = 262.43 A$$

Se seguirá la normativa IEC 60502 para la determinación de los factores de corrección y el cálculo de la sección de los cables.

La capacidad de transporte de corriente es la máxima corriente que un sistema de cableado puede transportar continuamente sin que esto afecte a su vida útil.

Para determinar la capacidad de transporte de corriente de un sistema de cableado en las condiciones de instalación reales, se debe realizar lo siguiente:

- Definir el método de instalación, el material que recubre y hace de protección y definir los factores de corrección.





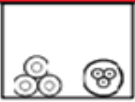
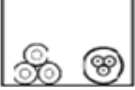

Installation methods	Example	Table column	Correction factors to be applied		
			f_0	f_1	f_2
A Conduits on wall		(3)	0.90	f_1	f_2
B Flush mounted conduits		(3)	0.90	f_1	f_2
Installed on cable trays		(3)	1	f_1	f_2
G Installed on brackets or cable ladders		(3)	1	f_1	f_6
H Troughs (enclosed)		(3)	0.90	f_1	f_2
J Ducts (open troughs)		(3)	1	f_1	f_6
L1 Conduits in open or ventilated channels		(3)	0.80	f_1	f_2

Tabla 4. Tipo de instalación (f_0)

Fuente: IEC 60502

Teniendo en cuenta el método de instalación previsto (bandeja de cables).

Obtenemos un $f_0 = 1$.

Además de que los cables no tienen mucha ventilación, se toma el valor conservador de la temperatura (+55°C).

Temperature °C	Type of insulating material	
	PVC PE	XLPE EPR
10	1.22	1.15
15	1.17	1.12
20	1.12	1.08
25	1.06	1.04
30	1.00	1.00
35	0.94	0.96
40	0.87	0.91
45	0.79	0.87
50	0.71	0.82
55	0.61	0.76

Tabla 5. Tipo de material (f_1)

Fuente: IEC 60502

Se considera que el tipo de material será XLPE, debido a que es el material que ofrece mejores características.

Obteniendo un valor de $f_1 = 0.76$

Como último factor de corrección para nuestro caso tenemos f_5 que se deduce su valor en la siguiente *Tabla 6*.

Installation method	Arrangement	Number of circuits or multi-core cables				
		2	3	4	6	> 9
f_5	On unperforated horizontal trays.....	0.85	0.80	0.75	0.70	0.70
f_6	On perforated horizontal trays or on brackets	0.90	0.80	0.80	0.75	0.75

Tabla 6. Factor del método de instalación

Fuente: IEC 60502

No obstante, la norma IEC 60502-2 dice que si se colocan los cables de media tensión en forma de trébol el anterior factor de corrección f_5 se considera 1.0. Teniendo en cuenta una reserva de capacidad del 25 % para posteriores ampliaciones, la intensidad admisible y el dimensionamiento del cable de será:

$$I_z = \frac{262.43 A}{(1.00 \times 1.00 \times 0.76)} \times 1.25 = 431.63 A$$

Con el siguiente valor de I_z y sabiendo que el conductor será de Aluminio, se entra en la *Tabla 7* y se obtiene el valor de nuestra sección de cable.

Sección nominal mm ²	90 °C 1,8/3 kV a 18/30 kV					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Conductores de Cu						
10	-	-	-	-	-	-
16	115	105	100	94	100	92
25	150	140	130	120	125	115
35	180	165	155	140	150	140
50	210	200	180	165	180	165
70	265	250	225	200	220	200
95	315	300	260	235	260	235
120	360	340	295	265	295	270
150	405	385	325	295	330	300
185	460	440	360	330	370	340
240	530	510	410	375	425	395
300	600	580	450	410	480	445
400	680	-	495	450	-	-
500	775	-	540	505	-	-
630	885	-	585	545	-	-
Conductores de Al						
16	88	80	80	72	76	70
25	110	105	100	92	95	90
35	135	130	120	110	115	105
50	160	155	140	130	140	125
70	200	190	175	155	170	150
95	240	225	205	185	200	180
120	275	260	230	210	225	205
150	310	295	255	235	250	230
185	355	335	290	265	285	255
240	415	390	330	300	325	295
300	470	455	365	335	375	345
400	540	-	410	375	-	-
500	620	-	455	425	-	-
630	710	-	505	470	-	-

- (1) Tres cables unipolares agrupados, instalados al aire.
 (2) Un cable trifásico, instalado al aire, protegido del sol.
 (3) Tres cables unipolares agrupados, enterrados a 1 m de profundidad.
 (4) Tres cables unipolares bajo tubo, enterrados a 1 m de profundidad.
 (5) Un cable trifásico, enterrado a 1 m. de profundidad.
 (6) Un cable trifásico bajo tubo, enterrado a 1 m de profundidad

Temperatura del terreno °C: 25
 Temperatura del aire °C: 40
 Resistividad térmica terreno K-m/W: 1,5
 Temperatura del conductor en °C: 90

Tabla 7. Tabla del Fabricante
Fuente: Fabricante de cables de MT

Finalmente, según el método descrito obtenemos una sección de cable de:

S1: 3x1x300 mm²

Cables que interconectan los edificios técnicos

Igual que antes calculamos I_B , I_z y los factores de corrección y consecuentemente la sección del cable.

$$I_B = \frac{10 \text{ MVA}}{22 \text{ kVA} \sqrt{3}} = 262.43 \text{ A}$$

En este caso, por el tipo de instalación el factor $f_0 = 0.9$

Installation method	Example	Table column	Correction factors to be applied			
			f_0	f_1	f_2	f_3
L3 Directly installed in open or ventilated channels		(3)	0.90	f_1	--	f_3
L4 Directly installed in enclosed channels		(3)	0.80	f_1	--	f_3
L5 Directly installed in channels filled with sand		(3)	0.80	f_1	--	f_3
N Troughs (in masonry)		(3)	0.90	f_1	--	f_3
P Manufactured blocks		(3)	0.90	f_1	--	f_3
S1 Directly buried (armoured cables)		P (1) D (2)	1	f_2	f_3	f_4
S2 Buried with mechanical protection		(1) (2)	1	f_2	f_3	f_4

Tabla 8. Tipo de instalación (f_0)

Fuente: IEC 60502

El valor de f_1 según la *Tabla 5* sigue valiendo 0.76 y el valor de $f_3 = 1$, ambos como en el caso anterior.

Teniendo en cuenta una reserva del 25 % para posteriores ampliaciones, la intensidad admisible y el dimensionamiento del cable de media tensión será:

$$I_z = \frac{262.43A}{(0,90 \times 0,76 \times 1)} \times 1,25 = 479.58 A$$

Por lo tanto, la sección requerida es, según la *Tabla 7*:

S1: 3x1x400 mm²

El cálculo de todos los cables de media tensión queda resumido en la siguiente *Tabla 9*. Todos los cálculos se han hecho siguiendo la metodología explicada.

Elemento	Sección
<i>De compañía a las celdas de MT</i>	3x1x300 mm ²
<i>Entre edificios técnicos</i>	3x1x400 mm ²
<i>De celda de MT a Transformador de 3150 kVA</i>	3x1x35 mm ²
<i>De celda de MT a Transformador de 2000 kVA</i>	3x1x16 mm ²
<i>De celda de MT a Transformador de 500 kVA</i>	3x1x16 mm ²

Tabla 9. Resumen de la sección de los cables de MT.

7.2. Caída de tensión

La caída de voltaje máxima que vamos a poder encontrar entre el Edificio Técnico Oeste y el Edificio Técnico Este (más distancia entre ellos) se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta U_{III} = (R + X \cdot \operatorname{tg} \varphi) \cdot \left(\frac{P}{U_1} \right)$$

Y con un breve desarrollo:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho \cdot L}{S} + \kappa \cdot L \cdot \operatorname{tg} \varphi \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{U_1} U_1 \cdot I \cdot \cos \varphi \right) \\ &= \sqrt{3} \left(\frac{\rho \cdot L}{S} \cdot \cos \varphi + \kappa \cdot L \cdot \operatorname{sen} \varphi \right) I \end{aligned}$$

Imagen 20. Cálculo caída de tensión
Fuente: UNE 60364

Con los siguientes datos:

- $L = 2 \text{ km}$
- $I = 262,42 \text{ A}$
- Cable = 3x1x400 mm² Al (para resistividad y reactancia)
- Resistividad = 0,1 Ω/km
- Reactancia = 0,106 Ω/km
- $V = 22 \text{ kV}$
- $\cos \phi$: factor de potencia de la carga eléctrica (0,9)

Se considera el valor de $I = 262,42 \text{ A}$, ya que este es el valor real y en la caída de tensión no se consideran los factores de corrección.

Se concluye que hay una caída de tensión a lo largo del túnel de 1065 V, es decir, un 4,84 %. Se considera aceptable, ya que esta caída de tensión es en el peor de los casos. Por consiguiente, la sección propuesta que interconecta ambos edificios técnicos está bien dimensionada.

De la misma manera, la caída de tensión hasta los Edificios Técnicos Norte y Sur será la mitad del valor calculado anteriormente. Por consiguiente, la caída de voltaje observada en estas ubicaciones será del 2,42 % en el peor de los casos.

1 x SECCIÓN CONDUCTOR (Al) (mm ²)	RESISTENCIA DEL CONDUCTOR A T 20 °C) (Ω/km)	RESISTENCIA DEL CONDUCTOR A T MAX (90 °C) (Ω/km)	REACTANCIA INDUCTIVA (Ω/km)		CAPACIDAD μF/km	
			12/20 kV	18/30 kV	12/20 kV	18/30 kV
1 x 95/16 (1)	0,320	0,410	0,123	0,132	0,217	0,167
1 x 150/16 (2)	0,206	0,264	0,114	0,123	0,254	0,192
1 x 240/16 (2)	0,125	0,161	0,106	0,114	0,306	0,229
1 x 400/16 (2)	0,078	0,100	0,099	0,106	0,376	0,277

(1) Secciones homologadas por las compañías del Grupo Endesa en 12/20 kV.

(2) Sección homologada por las compañías del Grupo Endesa en 12/20 kV y 18/30 kV.

Imagen 21. Tabla con características del cable según sección
Fuente: UNE 211620

7.3 Protecciones

Como protección en los circuitos eléctricos se incorporarán interruptores diferenciales para no dañar los equipos eléctricos durante una sobrecarga o cortocircuito. Ya que estos interruptores se colocan en las instalaciones eléctricas de corriente alterna con el fin de proteger a las personas de accidentes provocados por el contacto directo o indirecto. Se han escogido interruptores diferenciales ante fusibles ya que estos últimos cada vez que son usados hay que remplazarlos.

Se incorporarán relés térmicos para proteger los motores contra las sobrecargas débiles y prolongadas. Por lo que refiere a las protecciones en los transformadores podemos decir que los transformadores escogidos son los transformadores en seco, explicado en 8.4. Modelado Edificio Técnico Oeste, pág. 54, estos con una protección contra contactos es suficiente.

En todos los cables se incluirá cable de puesta a tierra.

Todos estos equipos son claves para garantizar la seguridad del usuario y de los elementos eléctricos

8. Modelado 3D

Como referenciado, se ha realizado el modelado del Edificio Técnico Oeste, el más completo de los cuatro, tanto de la arquitectura como de los elementos eléctricos que forman el sistema de media tensión y baja tensión.

El modelado se ha realizado mediante el software *Revit* que sigue la tecnología BIM. En los próximos apartados se explicará la tecnología BIM y se incorporaran y explicará el diseño 3D incorporando los elementos 3D y sus vistas.

8.1. Que es la tecnología BIM ?

BIM son las siglas de *Building Information Modeling*, una metodología de trabajo colaborativa para la creación y gestión de un proyecto de construcción. El modelado BIM consiste en administrar información detallada de una edificación, incluyendo aspectos referentes tanto a su diseño como a su mantenimiento, con la finalidad de evitar la pérdida de recursos y administrar de forma más exacta el tiempo en la construcción de la estructura, o eludir costes innecesarios en futuras remodelaciones.

Con el modelado BIM se consigue una mejor gestión de datos durante el ciclo de vida de un edificio, empleando un software dinámico de modelado de edificios en tres dimensiones y en tiempo real. Esta tecnología reúne la información de las construcciones de forma digitalizada, para su uso posterior en caso de reconstrucción o de mantenimiento.

Al final, se trata de diseñar un modelo digital lo más completo posible, y que contenga no solo información estructural sino también arquitectónica, térmica, climática, eléctrica, etc. Al digitalizar el edificio y obtener sus datos, podrá remodelarse de forma exacta en caso de sufrir desperfectos e, incluso, estos datos serán muy útiles a la hora de obtener un presupuesto en el que se puedan evitar costes derivados a recursos innecesarios. Por lo tanto, se garantiza la exactitud tanto en costes como en resultados.

8.2. Las dimensiones del BIM

3D. Modelado. En Revit el modelo puede incorporar, además de los elementos geométricos y de aspecto que ya conocemos, una infinidad de información valiosa que nos permite manejar datos y facilita la interoperabilidad en las distintas fases de un proyecto.

4D. Incorporación del tiempo. En el sistema BIM podemos incorporar al modelo información de fases de construcción que nos permitan, entre otras cosas, una simulación del avance de la obra y por lo tanto una fácil coordinación de los diferentes equipos y los plazos de entrada, salida y entregas de cada uno de los agentes que participan en la obra. La visualización detallada de los avances planificados podría ayudar a la coordinación y aprobación de pagos entre otras cosas

5D. Estimación, no solo de costos sino de recursos en general. Nuevamente son los datos que, integrados en el modelo, nos permiten estimar con mayor precisión los costes y mediciones con la increíble ventaja de que cada cambio que realicemos se refleja automáticamente en las tablas, puesto que mediciones y modelo no son algo que estén separados.

6D. Sostenibilidad. Cada vez es más incuestionable que el planteamiento de un edificio debe partir o al menos considerar temas de eficiencia energética y normativas medioambientales. Revit permite analizar el comportamiento energético de un edificio debido nuevamente a que el modelo comporta la información de los materiales, aperturas, orientación y demás elementos necesarios para dichos cálculos, además de las herramientas para realizarlos.

7D. Gestión. o Facility Management. Que son factibles gracias al detalle de la información *as built* y de los datos que incorpora el modelo en relación al soporte técnico o datos de contacto y de mantenimiento de los diferentes materiales y piezas aplicados.

8.3. Software *Revit*

Autodesk Revit es un software de Modelado de información de construcción (BIM, Building Information Modeling), para Microsoft Windows, desarrollado actualmente por Autodesk. Permite al usuario diseñar con elementos de modelación y dibujo paramétrico. BIM es un paradigma del dibujo asistido por ordenador que permite un diseño basado en objetos en tercera dimensión. Un cambio en algún lugar significa un cambio en todos los lugares, instantáneamente, sin la intervención del usuario para cambiar manualmente todas las vistas. Un modelo BIM debe contener el ciclo de vida completo de la construcción, desde el concepto hasta la edificación. Este es el software usado para modelar el Edificio Técnico Oeste.

8.4. Modelado Edificio Técnico Oeste

Mediante Revit se ha modelado el Edificio Técnico Oeste, se ha escogido este debido que es el edificio más completo de los cuatro. Se ha hecho el modelado de la arquitectura y de las instalaciones eléctricas de baja y media tensión.

El edificio mide 85 metros de largo por 10 metro de ancho. Se compone de dos pisos, la planta -1 situada a -4,1 metros por debajo del nivel de tierra y la planta 0 la cual tiene una altura de 4,8 metros.

En la planta 0, de oeste a este, se encuentran:

- Cuatro sales dedicadas a las celdas de media tensión.
- Nueve salas dedicadas a los distintos transformadores, tanto los elevadores como reductores.
- Una sala grande con todos los armarios de baja tensión.
- Otra sala con el sistema UPS
- El resto de salas dimensionadas no tienen relación con la instalación eléctrica de media y baja tensión como los baños, una sala para el personal, etc.

En la planta inferior se encuentran todas las bandejas de cables que unirán los diferentes equipos y las escaleras que intercomunican ambos pisos. Se han dimensionado todas las bandejas necesarias para las siguientes conexiones:

En un escenario normal:

- Desde el punto de conexión de la compañía a 22 kV hasta las celdas de media tensión.
- Desde las celdas de media tensión a los cinco transformadores, 2x3150 kVA (22/0,4 kV) y 3x2000 kVA (22/0,69 kV).
- Desde los transformadores a los diferentes cuadros de distribución (armarios de baja tensión).
- Desde los armarios de baja tensión al sistema UPS y a los diferentes circuitos que alimenten a las cargas finales.

En un escenario de emergencia (generadores se ponen en servicio):

- Desde los generadores situados al lado del edificio técnico hasta los cuatro transformadores elevadores 4x2500 kVA (0,4/22 kV).
- Desde los transformadores elevadores a las celdas de media tensión.
- Desde las celdas de media tensión a los cinco transformadores, 2x3150 kVA (22/0,4 kV) y 3x2000 kVA (22/0,69 kV).
- Desde los transformadores a los diferentes cuadros de distribución (armarios de baja tensión).
- Desde los armarios de baja tensión al sistema UPS y a los diferentes circuitos que alimenten a las cargas finales.

También se ha tenido en cuenta las bandejas necesarias para conectar el Edificio Técnico Oeste con los otros tres edificios técnicos restantes.

Estas conexiones se pueden ver y entender más fácilmente en el Anejo 2.

En el techo se encuentra una única bandeja de cables que sirve para hacer llegar los cables a los equipos Split del sistema de HVAC (clima).

Por lo que refiere a la planta 1 encontramos los siguientes elementos eléctricos

- Los transformadores elevadores de 4x2500 kVA (0,4 kV/22 kV)
- Los transformadores reductores de 3x2000 kVA (22 kV/0,4 kV)
- Los transformadores reductores de 2x3150 kVA (22 kV/0,69 kV)
- Las celdas de media tensión
- Los armarios de baja tensión
- El sistema UPS

Todos los transformadores se han considerado en seco ya que presentan mejores condiciones que los transformadores en aceite, ya que:

- Los transformadores en seco pueden colocarse muy cerca de la carga, lo que permite un ahorro considerable en el costo de los conductores y las protecciones de baja tensión.
- Debido a una mayor masa que sus equivalentes en líquido, su constante de tiempo es muy superior, por lo que soporta mejor las sobrecargas de corta duración, todo y que están dimensionados para no soportar sobrecargas.
- Al ser sus únicos elementos el circuito magnético las bobinas y los elementos de fijación, su diseño es muy compacto resultando un conjunto robusto y a prueba de vibraciones.
- El encapsulado hace que la resistencia a los esfuerzos electrodinámicos generados en un cortocircuito sea muy alta. Además de unirlos fuertemente entre sí. Por otro lado, la temperatura máxima transitoria alcanzada en un cortocircuito es más baja que en los transformadores en aceite, ya que la intensidad de corriente (intensidad por unidad de área) es inferior
- El mantenimiento es muy básico, ya que solamente se requiere alguna limpieza del polvo en las superficies, si éste llegara a producirse.
- Con una protección contra contactos es suficiente
- En caso de fuego externo al transformador y que afecte al mismo, éste arde con mucha dificultad y con llama débil, la cual al final se acaba extinguiendo.

Las dimensiones de las nueve salas donde se colocan los transformadores son de 5 metros de largo por 5 metros de ancho.

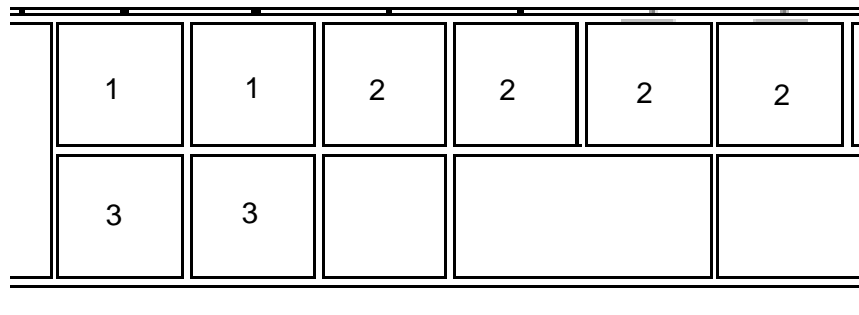


Imagen 22. Ubicación de los transformadores

Leyenda:

- 1. Sala transformador de 3150 kVA
- 2. Sala transformador de 2500 kVA
- 3. Sala transformador de 2000 kVA

Los transformadores se colocan horizontalmente centrados en la sala y verticalmente a 1 metro de la pared que separa las salas.

La sala donde se sitúa el equipo de UPS mide 5,5 metro de largo por 6 metros de ancho.

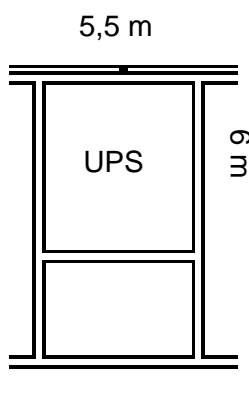


Imagen 23. Salas de media tensión

Verticalmente se sitúa a 1 metro de la pared exterior del edificio y horizontalmente se sitúa desplazado hacia la derecha, concretamente a 1,5 metros de la pared situada a la derecha en la imagen 23.

Respecto los equipos de media tensión hay cuatro salas destinadas a las celdas de media tensión, en la primera sala es donde se produce la conexión de la red de compañía con las propias celdas de media tensión. Una de las tres salas restantes sirve para colocar las celdas que se relacionarán con el embarrado de emergencia que conecta los generadores con los transformadores reductores, y en las otras dos salas se encontrará el embarrado 1 y el embarrado 2 explicados en 4. Media tensión, pág. 13. Que conecta el embarrado donde se conecta la compañía con los transformadores elevadores.

Las dimensiones de las salas de media tensión donde se encuentra el embarrado 1, el embarrado de emergencia y la sala donde se realiza el conexionado de la compañía miden 8 metros de largo por 5m de ancho, por el contra, la sala donde se ubica el embarrado 1 mide 10 metros de largo por 5 metros de ancho.

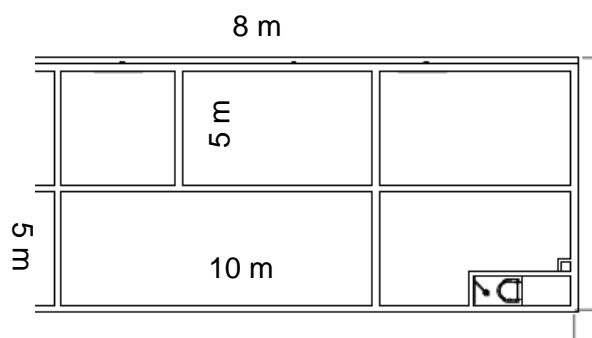


Imagen 24. Dimensión Salas de media tensión

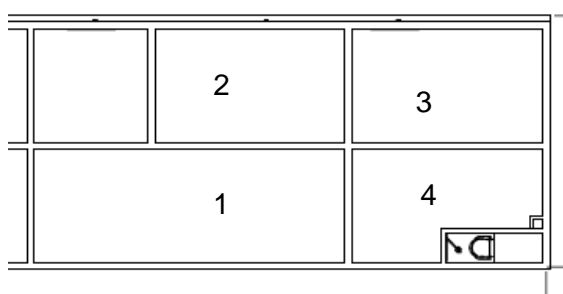


Imagen 25. Salas de media tensión

Leyenda:

1. Sala de MT con el embarrado 1
2. Sala de MT con el embarrado 2
3. Sala de MT con el embarrado de emergencia
4. Sala de conexionado de compañía

Las celdas de media tensión se han colocado junto a las paredes que separan las salas y se ha impuesto distancia mínima de seguridad de 0,8 metros a las paredes de dichas salas.

Por lo que refiere a los armarios de baja tensión se encontrarán divididos en cuatro tipos de cuadros de distribución según la línea de baja tensión en la que trabajen.

En la línea de 690 V encontraremos el cuadro de centro de control de los ventiladores (MCC) que como indica su nombre distribuirá la energía hasta los diversos ventiladores situados en los túneles.

En la línea de 400 V encontraremos tres tipos de cuadros, el cuadro de distribución principal (MDB), el cuadro de distribución secundario (SMDB) y el cuadro de distribución final (DB). El cuadro de distribución principal será alimentado por los dos transformadores de 3150 kVA (22/0,40 kV) y servirá para alimentar el sistema UPS y a los cuadros de distribución secundarios, estos alimentarán algunas cargas finales como a los equipos de climatología del edificio, etc. También alimentarán al cuadro de distribución final y serán estos quien finalmente alimenten a los diferentes circuitos que alimentarán a las cargas finales situadas en el edificio técnico.

La sala donde se encurtan las celdas de media tensión mide 21 metros de largo por 10 metros de ancho.

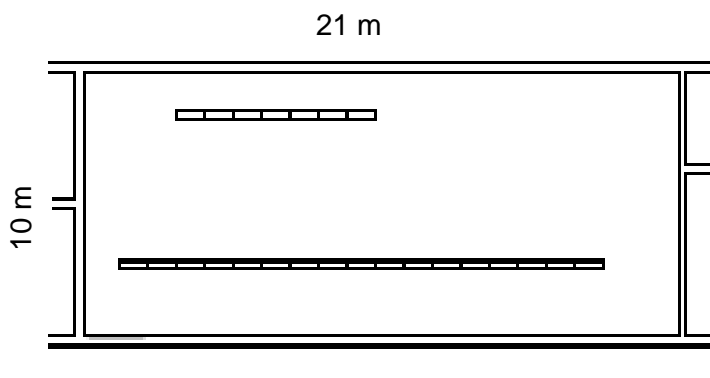


Imagen 26. Dimensiones de la sala de baja tensión

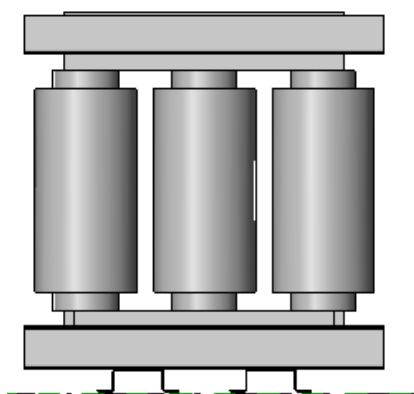
Los armarios tienen una distancia entre ellos de 5,5 metros y están colocados verticalmente a 1,5 metros de la pared los que se observan en la parte superior de la imagen 26, y a 3 metros los de la parte inferior.

8.4.1. Transformador 2500 kVA (0,4 kV/22 kV)

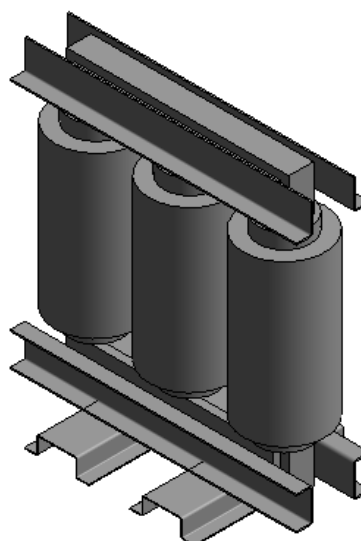
Se han colocado cuatro transformadores elevadores de 2500 kVA de potencia para transformar el voltaje proveniente de los generadores (0,4 kV) a 22 kV, voltaje que servirá para conectarse a las celdas de media tensión. Como explicado en 4.3. Energía de emergencia, pág. 27.

Las dimensiones del transformador se darán considerando la distancia máxima en cada dirección, se han cogido transformadores de la compañía *Schneider electric* como modelo.

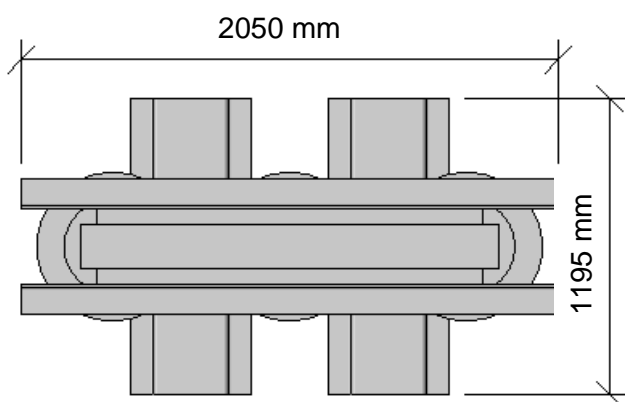
En las próximas imágenes se muestran las vistas de alzado, planta, vista lateral y vista 3D del transformador.



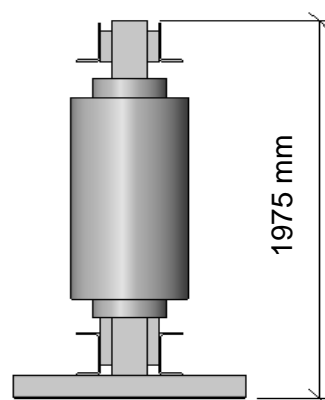
ALZADO



VISTA 3D



PLANTA



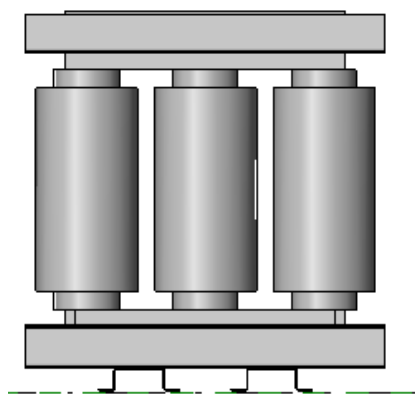
VISTA LATERAL

8.4.2. Transformador 2000 kVA (22/0,69kV)

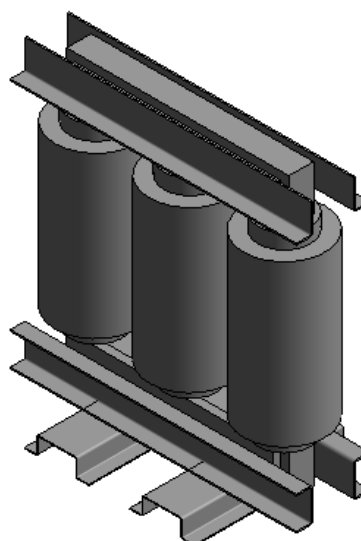
Se han colocado tres transformadores reductores de 2000 kVA de potencia para transformar el voltaje proveniente de la compañía a 22 kV a 0,69 kV, voltaje que servirá para alimentar a los ventiladores de los túneles. Como explicado en 5.2. Sistema de baja tensión de 690V, pág. 30.

Las dimensiones del transformador se darán considerando la distancia máxima en cada dirección, se han cogido transformadores de la compañía *Schneider electric* como modelo.

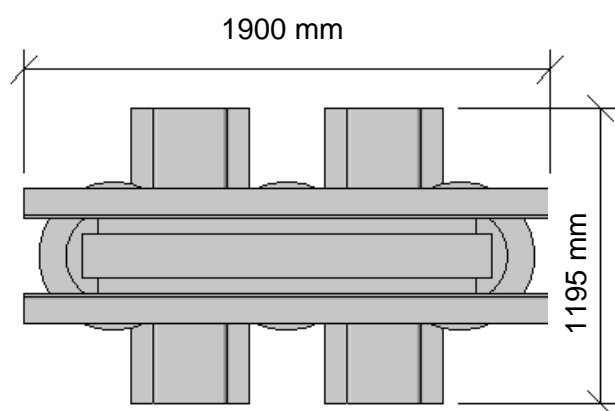
En las próximas imágenes se muestran las vistas de alzado, planta, vista lateral y vista 3D del transformador.



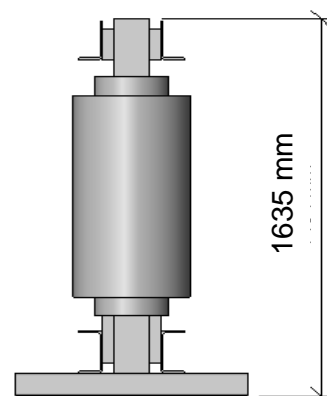
ALZADO



VISTA 3D



PLANTA



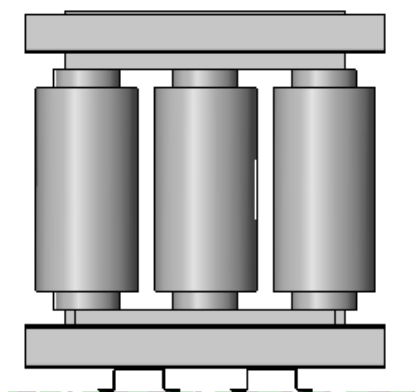
VISTA LATERAL

8.4.3. Transformador 3150 kVA (22/0,4kV)

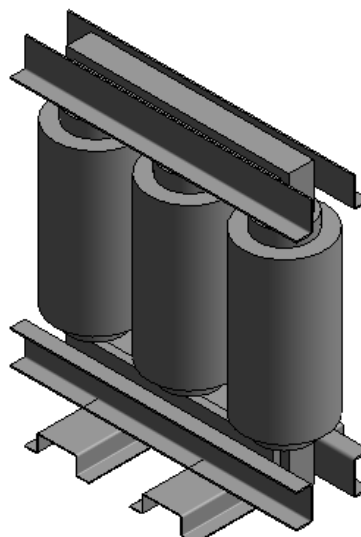
Se han colocado dos transformadores reductores de 3150 kVA de potencia para transformar el voltaje proveniente de la compañía a 22 kV a 0,40 kV, voltaje que servirá para alimentar al resto de cargas tanto del edificio técnico como del túnel. Como explicado en 5.3. Sistema de baja tensión de 690V, pág. 31.

Las dimensiones del transformador se darán considerando la distancia máxima en cada dirección, se han cogido transformadores de la compañía *Schneider electric* como modelo.

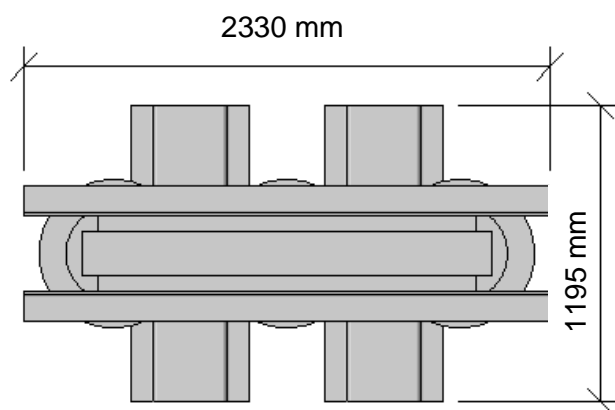
En las próximas imágenes se muestran las vistas de alzado, planta, vista lateral y vista 3D del transformador.



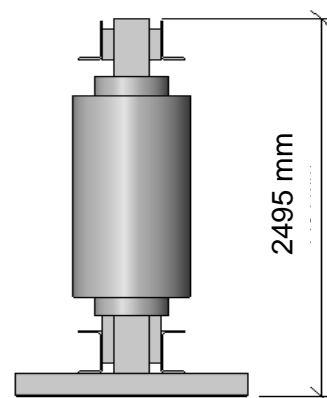
ALZADO



VISTA 3D



PLANTA



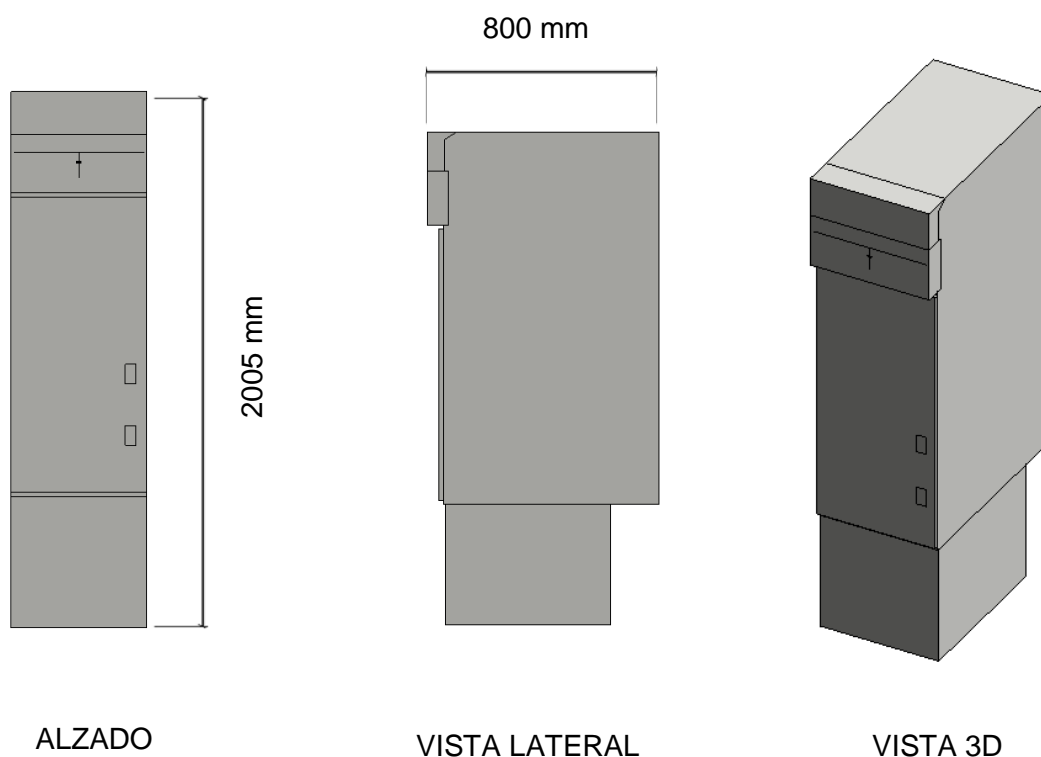
VISTA LATERAL

8.4.4. Celdas de media tensión

Se han colocado 24 celdas de media tensión que son conjunto continuo de secciones verticales en las cuales se ubican equipos de maniobra como interruptores de potencia extraíbles, seccionadores, etc. y cuando se solicite, equipos de protección y control, con la función de recibir y distribuir la energía eléctrica de forma segura y eficaz desde la compañía hasta los transformadores.

Las dimensiones del transformador se darán considerando la distancia máxima en cada dirección, se han cogido la celda SM6 de la compañía *Schneider electric* como modelo.

En las próximas imágenes se muestran las vistas de alzado, vista lateral y vista 3D del transformador. La anchura es de 800 mm.

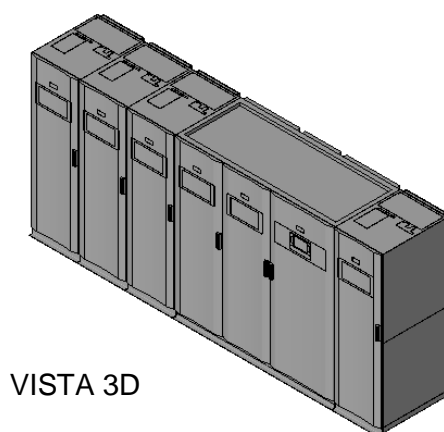


8.4.5. SAI

Se ha colocado un equipo SAI Online de 60 minutos, este es el más completo de todos, ya que convierte la energía entrante en energía completamente limpia a través de un proceso de transformación donde la energía entrante alterna es transformada en continua, para luego volver a ser ya alterna, pero totalmente filtrada. Es un modelo pensado para servidores que estén funcionando 24/7, que necesitan la máxima estabilidad y seguridad posible, como se explica en 5.6. Energía de emergencia, pág. 35

Las dimensiones del transformador se darán considerando la distancia máxima en cada dirección, se han cogido un SAI de la compañía *Schneider electric* como modelo, durante el proyecto no se ha dimensionado el SAI, y finalmente se ha puesto un SAI de 1250-1500 kVA, el más grande encontrado.

En las próximas imágenes se muestran las vistas de alzado, vista lateral y vista 3D del SAI. La anchura es de 4400 mm.

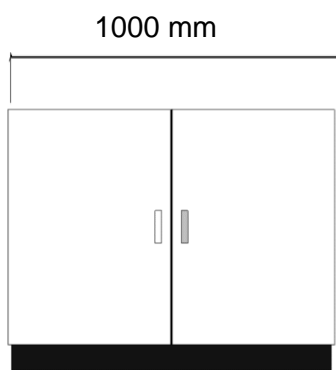


8.4.6. Armario de Baja Tensión

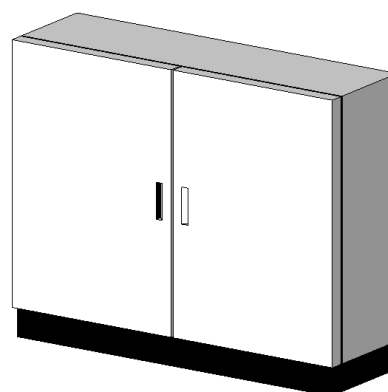
Se han colocado 24 armarios de baja tensión que son conjunto continuo de secciones verticales que tienen la función de recibir y distribuir la energía eléctrica de forma segura y eficaz desde los transformadores hasta las cargas finales. En nuestro caso los armarios de baja tensión son los tres tipos de cuadros de distribución (MDB, SMDB y DB).

Las dimensiones de los armarios de baja tensión se darán considerando la distancia máxima en cada dirección, se han cogido los armarios de baja tensión de BIM & CO como modelo.

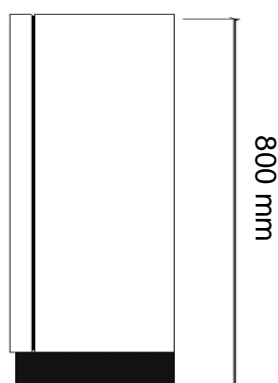
En las próximas imágenes se muestran las vistas de alzado, vista lateral y vista 3D del transformador. La anchura es de 800 mm.



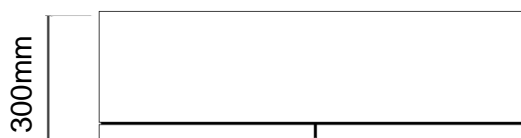
ALZADO



VISTA 3D



VISTA LATERAL



PLANTA

8.4.7. Bandejas de cables

Por lo que refiere a las bandejas de cables, se clasificarán según dimensión y según tipo. Según dimensión se clasificarán por anchura y altura y encontraremos las siguientes bandejas:

- Bandeja de 100x200 mm
- Bandeja de 100x400 mm
- Bandeja de 100x600 mm
- Bandeja de 100x1000 mm

Las bandejas más pequeñas llevarán principalmente los cables desde el cuadro de distribución hasta las cargas finales, las bandejas de 100x400 interconectarán las celdas de media tensión con los transformadores y las bandejas de 100x600 mm llevarán los cables desde los distintos transformadores hasta los armarios de baja tensión. Por último, las bandejas de 100x1000 mm servirán para conectar los generadores con los transformadores elevadores y para llevar los cables que conectarán los transformadores de 3150 kVA con los ventiladores en los túneles.

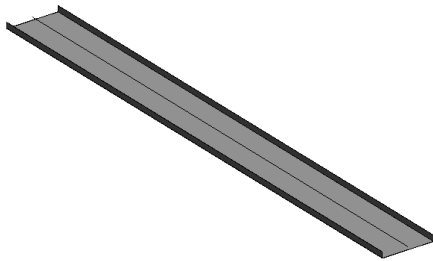
Según tipo se clasificarán en las siguientes bandejas:

- Bandeja de cable recta
- Bandeja de cable de giro de 90°
- Bandeja de cable de cambio de sección
- Unión de tres bandejas cable
- Unión de cuatro bandejas cable

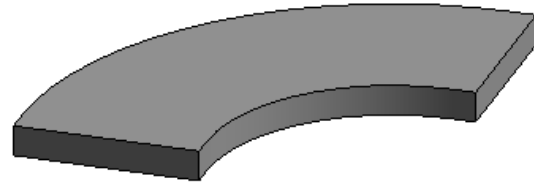
Como se podrá ver en el Anejo1, se han considerado entre dos y tres niveles por cada tirada de bandeja.

Se dibujan las bandejas de cable ya que en el software Revit no está permitido dibujar los cables.

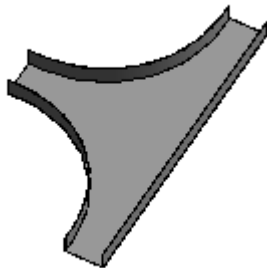
En las próximas imágenes se muestran las variedades de bandeja según tipo:



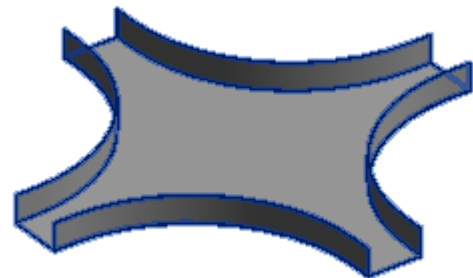
Bandeja de cable recta



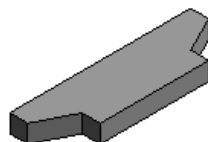
Bandeja de cable giro 90°



Unión de tres bandejas de cable



Unión de cuatro bandejas de cable



Bandeja de cable de cambio de sección

9. Organigrama

El proyecto es una obra compleja que conlleva la ejecución de muchos proyectos simultáneamente, como pueden ser:

- El estudio y tratamiento de las tierras.
- La obra civil para la construcción de la nueva infraestructura.
- El desarrollo de las comunicaciones.
- El sistema de ventilación.
- El diseño y desarrollo de la instalación eléctrica.
- ...

Dentro de muchos de estos sub-proyectos está el desarrollo con *Revit* y la tecnología BIM.

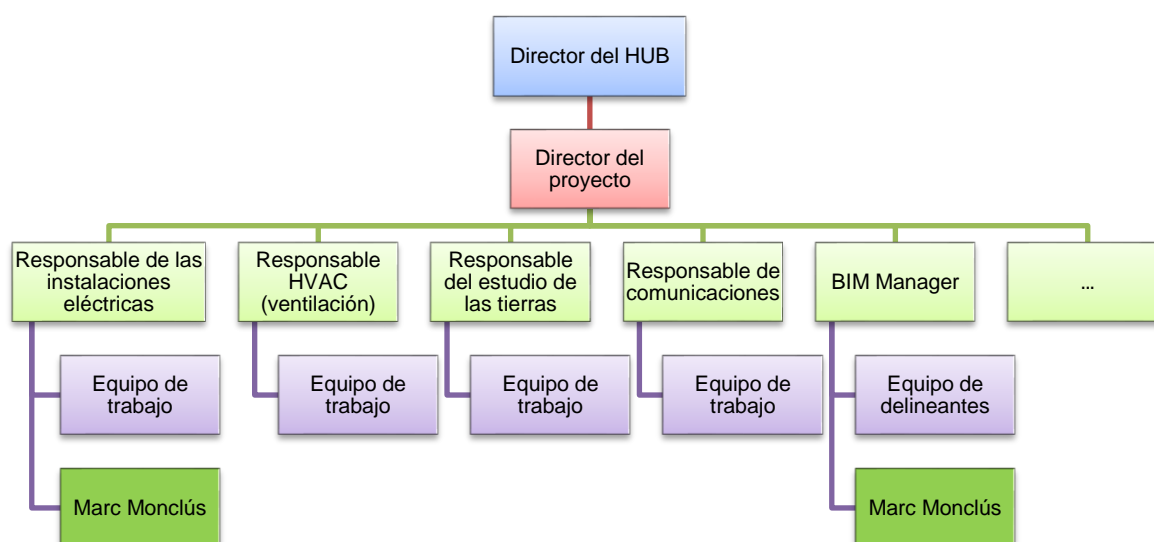
Se ha realizado un organigrama con tal de poder explicar mejor mi implicación en el proyecto y la función de las personas que han trabajado conmigo.

Como se puede observar en el *esquema 1* el proyecto está encabezado por el director del HUB, que es la persona que trata juntamente con el director del proyecto con el contratante, este último, además coordina los diferentes sub-proyectos que forman la obra total, como descrito en el esquema hay un responsable para cada disciplina y junto a ellos un equipo de trabajo y a veces un equipo de delineantes.

Mi función durante el proyecto recae en la disciplina de las instalaciones eléctricas y en la del modelado 3D, por lo que refiere a la disciplina de instalaciones eléctricas junto con el equipo de trabajo se han planteado las diferentes situaciones de emergencia tanto en media tensión como en baja tensión, y se han dimensionado los diferentes equipos para buscar una solución, en el caso de baja tensión encontré rápidamente la solución a los diferentes modos degradados dando redundancia a los alimentadores tanto en la línea de 400 V como en la línea de 690 V, en el caso de media tensión buscar la solución y plantear, por ejemplo, cuantos embarrados se necesitaban y saber si tenían que estar seccionados o no o en qué posición tenían que estar los disyuntores fue más complicado y es por eso que en estos

apartados trabajé más conjuntamente con un miembro del equipo de la sección de instalaciones eléctricas.

En el modelado 3D trabajé conjuntamente con el BIM Manager todo y que debido a que coordinaba todos los desarrollos en Revit de las diferentes disciplinas no pudo ayudarme mucho, no obstante, mediante la página web de ayuda de Revit y de un delineante se ha hecho el modelado de la estructura del Edificio Técnico Oeste y de sus equipos eléctricos con éxito, siempre supervisado por el mismo BIM Manager y por el responsable de instalaciones eléctricas. En favor al Revit hay que decir que debido a la experiencia previa con el software SolidWorks muchos de los conceptos necesarios para modelar ya estaban adquiridos, todo y que el mayor peso del trabajo en horas está en el modelado.



Esquema 1. Organigrama de la empresa

10. Diagrama de las actividades

Este trabajo se ha realizado durante el curso 2019-2020. Su fecha de inicio ha sido su fecha de registro, es decir, 1 de octubre de 2019. El proyecto ha finalizado el día 16 de enero de 2020, su día de entrega. El recorrido del proyecto ha tenido diversas fases las cuales se explican de forma básica a continuación.

Podríamos decir que la primera parte es la de familiarización y búsqueda, ya que antes de empezar cualquier proyecto es importante realizar una primera toma de contacto.

En segundo sitio se ha analizado las posibles situaciones de conflicto y se ha buscado su solución. Y, Por último, se ha realizado el diseño y modelado 3D del Edificio Técnico Oeste.

NOMBRE ACTIVIDAD	FECHA INICIO	DURACIÓN	FECHA FIN
Familiarización con el proyecto	01/10/2019	4	05/10/2019
Búsqueda y definición de los elementos y estructura de media tensión	05/10/2019	7	12/10/2019
Búsqueda y definición de los elementos y estructura de baja tensión	12/10/2019	7	19/10/2019
Definición de posibles situaciones de emergencia	19/10/2019	13	01/11/2019
Búsqueda de solución a las situaciones de emergencia	01/11/2019	15	16/11/2019
Familiarización con el software Revit	13/11/2019	15	28/11/2019
Diseño de la arquitectura	22/11/2019	20	12/12/2019
Diseño de los elementos y modelado 3D	13/12/2019	25	07/01/2020
Realización de los cálculos eléctricos	07/01/2020	2	09/01/2020
Conclusiones	09/01/2020	2	11/01/2020
Revisión y correcciones	11/01/2020	3	14/01/2020

Tabla 10. Tabla de las actividades realizadas.

Se ha realizado un diagrama de Gantt para que sea más visual las actividades desarrolladas durante el proyecto. El diagrama de Gantt es una herramienta útil para planificar proyectos y proporciona una vista general de las tareas programadas.

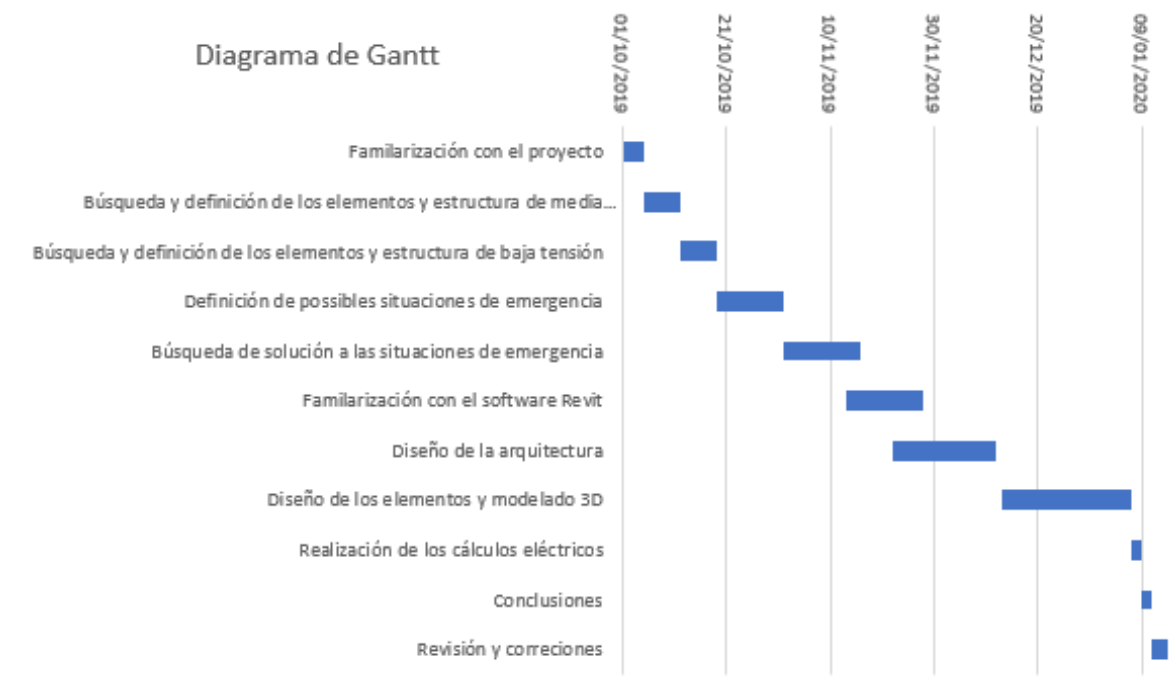


Imagen 23. Diagrama de Gantt

11. Presupuesto

Llegados a este punto, se ha realizado un estudio económico del coste de las instalaciones eléctricas considerados en el proyecto. Se ha realizado una aproximación, como si el cliente contractara directamente a un ingeniero en junior y cuatro ingenieros senior.

En la siguiente *Tabla 11* se ha hecho un resumen de los gastos producidos durante la realización del proyecto. De esta manera, se ha visto que la parte más importante que contribuye al aumento del precio del proyecto son los equipos de media tensión, seguido del personal.

Además, para la realización del proyecto se ha considerado una potencia contratada de 3kW, con un coste de 0.15 € el kW/h

Por otro lado, se ha añadido un 30% de beneficios al coste total del proyecto destinados a la empresa.

Para concluir, el beneficio de la empresa es de **142.380 €** y el precio que deberá pagar el contratante es de **740.583,50 €**.

CONCEPTO	PRECIO UNITARIO	TIMEPO	UNIDADES	TOTAL [€]
Ingeniero Junior	45 €/H	380 HORAS	1	17.100
Ingeniero Senior	60 €/H	250 HORAS	4	60.000
Licencia Revit	4000€/AÑO	5 MESES	-	2.000
Microsoft office	5,75€/MES	5 MESES	-	23
Transformador 2500 kVA	20.000 €	-	7	140.000
Transformador 3150 kVA	26.000 €	-	2	52.000
Celdas de media tensión	6.000 €	-	24	144.000
Armarios de baja tensión	1,500 €	-	24	36.000
Bandejas de cables	15 €/M	-	910 M	13.650
SAI	10.000 €	-	1	10.000
Total				474.773
Total + beneficio	30%			617.153
Total+beneficio+IVA	21%			740.583,50 €

Tabla 11. Coste total del proyecto

12. Conclusiones

En el presente trabajo se han conseguido dimensionar y establecer los diferentes equipos eléctricos de media y baja tensión que hagan frente a una distribución de la energía de forma segura y eficaz en frente de cualquier situación de emergencia de los túneles, por lo tanto, se ha logrado el objetivo principal. Primeramente, se han buscado los equipos necesarios tanto de media como de baja tensión para poder distribuir la energía, y con la demanda de potencia de todas las cargas situadas en el túnel y en los edificios técnicos se ha podido dimensionar los elementos como los transformadores, bandejas de cables, etc.

Hay que remarcar que para conseguir el dimensionado de los equipos de una forma eficaz se ha seguido con el siguiente criterio, que un simple fallo puntual en cualquier elemento no resulte la pérdida o degradación de todo sistema de red eléctrica. Y para cumplir con este concepto se han considerado dos aspectos. El primero, la redundancia, que consiste en mejorar la fiabilidad del sistema mediante la duplicidad de elementos. Y el segundo, sería la independencia entre elementos, que consiste en garantizar que para una función dada por elementos redundantes no existan elementos comunes susceptibles de causar daños.

Cabe decir que no se ha podido cumplir con el dimensionamiento preciso del equipo de UPS ya que no se ha podido analizar ni obtener con la suficiente profundidad el consumo de las cargas de emergencia en los escenarios donde podrían demandar el mayor consumo de potencia.

Lo mismo ha sucedido con las celdas de media tensión y los cuadros de baja tensión, ya que el número de celdas o de armarios se ha dimensionado de forma aproximada con la ayuda del equipo de trabajo de las instalaciones eléctricas, mediante la carga total de cada edificio técnico en los diferentes escenarios explicados y con la experiencia del equipo de trabajo en proyectos similares, ya que en SENER usan el software Caneco para realizar estos cálculos y no he podido desarrollarlo ya que el programa es bastante complejo.

Por lo que refiere al modelado 3D se ha logrado con los objetivos establecidos ya que se ha podido representar todos los elementos eléctricos y la estructura del Edificio técnico Oeste. Primeramente, se tomó la decisión de donde iban los equipos eléctricos, se tomó esta decisión antes de empezar el modelado con el fin de poder realizar el dimensionado de la estructura de una forma más efectiva y no tener que estar modificándola constantemente. Luego se realizó el modelado de las bandejas de cables, en el momento de colocarlas tuve algunos problemas ya que muchas de ellas coincidían en algún punto y quedaba un esquema de bandejas que no se entendía y es por eso que se ha estructurado en diferentes niveles. Por otro lado, al principio únicamente había colocado un nivel por cada bandeja y finalmente junto con el BIM master y el responsable de instalaciones eléctricas se decidió poner más de un nivel por cada bandeja que cumpliera la misma función ya que con una no bastaba.

Finalmente, no se ha realizado el modelado 3D de los generadores diésel de emergencia ya que quedaban fuera del edificio técnico Oeste e implicaba realizar otro diseño de la arquitectura.

Otro inconveniente encontrado al mostrar el diseño 3D es que sin el software Revit es más difícil más apreciar y entender los elementos colocados, ya que este programa permite cortar el edificio en cualquier tipo de sección y en cualquier ángulo, también permite colocarte en una vista como si estuvieras dentro del edificio. Además, permite analizar la información de cada elemento colocado como por ejemplo, la tensión de entrada y de salida de los transformadores, la potencia y dimensión del sistema UPS, etc.

En el Anejo 1, donde aparecen los planos, cabe comentar que no se han podido añadir las cotas ya que debido a la escala del dibujo no se veía el valor de la cota y es por eso que se ha añadido en la memoria

Todo y esto, se ha podido modelar de una forma eficaz la arquitectura y el sistema de media y baja tensión del edificio técnico así cumpliendo con los objetivos propuestos.

Realizar este trabajo me ha servido para valorar más la importancia de un buen estudio y dimensionamiento de los equipos eléctricos que tienen que aparecer en cualquier instalación eléctrica de una infraestructura, ya que en ello recae parte de la seguridad de las personas que utilizan estas infraestructuras.

Además, me ha servido para obtener muchos más conocimientos sobre cómo funcionan las redes eléctricas de los edificios.

Con la realización del modelado me ha permitido aprender conocimientos del programa Revit y entender mucho mejor la tecnología BIM y su importancia en la obra de un proyecto.

Como conclusión personal, con este proyecto he podido ver aún más como funciona la estructura de un grupo de trabajo y como se trabaja en ella. Por lo tanto, valoró positivamente este proyecto ya que he aprendido conocimientos nuevos sobre este sector de la ingeniería, convirtiéndome en un mejor profesional.

12. Bibliografía

Como fuentes de información la mayoría de ellas han sido profesionales ya que el trabajo se desarrolla en una empresa y consecuentemente con grupo de trabajo. Los conocimientos aprendidos y expuestos durante el trabajo sobre las instalaciones eléctricas básicamente han sido explicados por el responsable de instalaciones eléctricas del proyecto que además es mi tutor en mis practicas extracurriculares en la empresa y otra persona del equipo de instalaciones eléctricas. Por lo que refiere al modelado, los conocimientos aprendidos de como funciona el software han sido aprendidos mediante la web de ayuda del programa, el BIM Master y los delineantes. También he tenido como referencia otros proyectos realizados en la empresa, que me han servido para tenerlos como base y poder desarrollar mejor el trabajo.

- [1] *Varios autores, Revit help* [<https://help.autodesk.com/view/RVT/2019/ESP/>]
- [2] *Varios autores, Schenider Electric products* [<https://www.se.com/es/es/all-products/>]
- [3] *Lucas Bruno, Celdas de media tensión* [<http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com/search/label/Celdas%20de%20MT>]
- [4] *Varios autores, transformador tipo en seco* [<https://www.electricaplicada.com/tipos-caracteristicas-transformadores-tipo-seco/>]
- [5] *Varios autores, transformador de tipo en seco* [<https://www.prysmianclub.es/caida-tension-sistemas-trifasicos/>]
- [6] *Varios autores, normativa Une y IEC* [<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/>]
- [7] *Varios autores, precio elementos* [<http://www.generadordeprecios.info/>]
- [8] *Varios autores, visualizador IFC* [<https://bimvision.eu/es/strona-glowna-es/>]

13. Agradecimientos

Primero de todo quiero agradecer a la empresa SENER por darme la oportunidad de poder realizar mi proyecto de fin de grado con ellos y a todos sus empleados que han formado parte de ello, ya que han sido de una gran ayuda y sin ellos no hubiera podido realizar el proyecto.

También agradecer a los profesores Joaquín Fernandez Sanchez por tutorizarme el trabajo, juntamente con Francisco Alpiste Penalba

Finalmente, me gustaría agradecer la ayuda de amigos familiares y compañeros por su soporte durante el desarrollo del trabajo.